

# INGENIO

REVISTA CIENTÍFICA ARBITRADA

**UNEFA**

UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
EXPERIMENTAL  
POLITÉCNICA  
DE LA FUERZA  
ARMADA  
NACIONAL  
BOLIVARIANA

NÚMERO 1 - AÑO 2017

# Nota Editorial

La utilización práctica del conocimiento científico es lo que define a la Ingeniería como ciencia aplicada y la hace diferenciarse de la ciencia pura en sí, siendo la primera la que por aplicación experta, ha logrado cambios fundamentales en la vida del hombre. Las ciencias aplicadas se encuentran cada vez más vinculadas al beneficio de la sociedad, con mayor énfasis siempre que vaya acompañado de progreso ético. Como decía Einstein, el progreso ético es la única cura para el progreso científico. Y estas ciencias aplicadas no serían nada sin un proceso de investigación el cual, según Machado (2014), es un proceso que contribuye al conocimiento, que debe partir de premisas básicas como el pluralismo, la discusión a todos los niveles de las ideas y lo más importante es su contribución a la sociedad.

Es así como se presenta en el primer artículo el diseño preliminar de un motor cohete de combustible sólido para posicionar Nanosatélites en órbita baja realizado por los ingenieros aeronáuticos André Prialé Cappa y Tulio Rafael Salazar, a partir de métodos de diseño probados en cohetes portadores y sonda.

El segundo artículo presenta un Análisis de los Sensores para la evaluación de la Enfermedad de Parkinson, desarrollado por un equipo multidisciplinario de investigadores de diferentes universidades como son la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional Bolivariana y la Universidad Simón Bolívar de Venezuela, la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador y la Universidad Sergio Arboleda de Colombia. Este trabajo estudia y presenta un análisis comparativo de las principales características de sensores desarrollados para la adquisición de datos y medición de diferentes tipos de movimiento.

EL ingeniero Juan de D. Perea Arias, docente de la Unefa, presenta en el tercer artículo un Sistema de control vehicular autónomo con controlador inteligente de tráfico de alta resolución. También docentes de la Unefa, los ingenieros Ángel Jesús Barrera y Jesús Enrique Bracho Velasco, desarrollan en el cuarto artículo de esta revista, una guía práctica de la asignatura Antenas con los recursos disponibles en el laboratorio de la Unefa Coro.

Finalmente en el quinto artículo presentado por el ingeniero Carlos Horacio Alviarez Serrano, se presenta el diseño de un programa computacional para el análisis aerodinámico y de trimado de un helicóptero de configuración convencional, en el cual fue la teoría del elemento de pala en combinación con la teoría de cantidad de movimiento el método para calcular la aerodinámica del roto.

Damos salida y puesta en publicación al primer número de la Revista Ingenio, agradeciendo y reconociendo de manera especial a los docentes investigadores que dejaron sus aportes y al cuerpo de árbitros que evaluaron el material sensible a publicar, gracias a las cuales, es posible la salida de esta revista dedicada a mostrar los aportes en las áreas de Ingeniería y Tecnología, como un reflejo de la calidad de ingenieros egresados de la Unefa y permite servir como fuente primaria para los procesos de investigación en las ciencias aplicadas.

GD. JULIO EMERIO CÁRDENAS SANDÍA  
DOCTOR

# Diseño preliminar de un motor cohete de combustible sólido para posicionar Nanosatélites en órbita baja.

*(Preliminary design of a solid fuel rocket engine to position Nanosatellites in low orbit).*

Andrè Priale Cappa<sup>1</sup> Tulio Rafael Salazar<sup>2</sup>

Universidad Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional (UNEFA), Vicerrectorado de Investigación Innovación y Desarrollo (VIDI), Coordinación de Laboratorios Pruebas y Ensayos<sup>1</sup>

Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales (ABAE), Unidad de Educación Espacial<sup>2</sup>

andrepriale@gmail.com<sup>1</sup>, tuliosalazar@gmail.com<sup>2</sup>

## RESUMEN.

El diseño de un motor cohete es un proceso meticuloso, en el cual influyen factores internos y externos con los que se busca el equilibrio para completar de manera satisfactoria la misión. La función del bloque motor es fundamental, debido a que esta es la encargada en generar el empuje necesario para que el vector escape de la atmósfera y posicione la carga útil en la órbita necesaria.

Actualmente, los motores cohetes son el vehículo más potente que se poseen para posicionar carga útil en el espacio, dentro del bloque motor se genera un violento proceso físico/químico el cual por medio de una tobera se transforma en empuje necesario para movilizar al vector. Pese que en la actualidad se han desarrollado nuevos tipos de motores, tales como los iónicos o ramjet, estos aun no generan un empuje lo suficientemente alto como para ser utilizados en la etapa inicial de un cohete espacial.

En el presente artículo se desarrolló, a partir de métodos de diseño probados en cohetes portadores y sonda, el diseño de un motor cohete, el cual incluye: selección del material para el case, espesor de pared para que soporte la selección y dimensionamiento del inhibidor y propiedades térmicas del mismo y con capacidad de poner en órbita baja (LEO) un Nanosatélite de 1U.

**Palabras clave:** *Cohetes sonda, Combustible Sólido, Motor Cohete, Órbita Baja, Nanosatélite.*

**ABSTRACT.** The design of a rocket engine is a meticulous process, in which an infinite number of internal and external factors influence the search for equilibrium in order to satisfactorily complete the mission. The function of the motor block is fundamental since it is in charge of generating the necessary thrust so that the vector can escape from the atmosphere and position the payload in the necessary orbit.

At the moment the rocket motors are the most powerful vehicle that they are possessed to position payload in the space, inside the motor block a violent physical / chemical process is generated which by means of a nozzle becomes a

push necessary to mobilize the vector. Although new types of engines such as ionic or ramjet have been developed at present, they do not yet generate a thrust high enough to be used in the initial stage of a space rocket.

In the present paper, the design of a rocket engine, which includes: selection of material for the case, wall thickness so that it can withstand, selection and dimensioning of the inhibitor is developed from proven design methods in carrier rockets and sounding rockets and thermal properties thereof.

**Keywords:** *Probe Rockets, Solid Fuel, Rocket Engine, Low Earth Orbit, Nanosatellite*

## I. INTRODUCCIÓN

En un motor de combustible sólido todo el propelente se encuentra ubicado dentro de la cámara de combustión (Grano Propelente), este al momento de ser moldeado puede tener varias configuraciones, según los requerimientos de empuje y tiempo del diseño. [1]

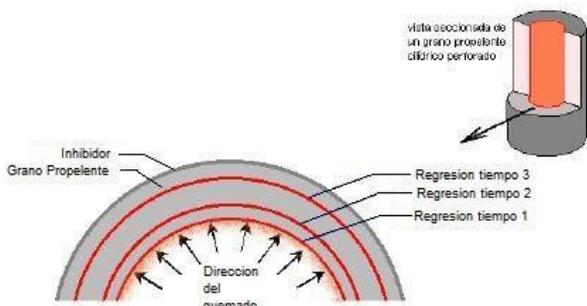
Cada configuración del propelente sólido se quema a velocidades diferentes, puesto que las superficies de quemado van a diferir entre una y otra.

En el presente artículo se detallan los pasos necesarios para calcular y posteriormente diseñar un motor cohete de combustible sólido con capacidad de posicionar en órbita baja un Nanosatélite.

## II. Descripción del quemado de grano propelente en un motor cohete

El proceso de combustión en un motor cohete consta del quemado uniforme en todas las superficies expuestas del cartucho, estas se van consumiendo en dirección normal a la superficie original hasta llegar a las paredes del case, el cual está protegido por capas de inhibidores para evitar su degradación por las altas temperaturas. [1]

En un cartucho de tipo cilíndrico, como aquel mostrado en la figura 4,6, la ignición en el tiempo 0 ( $t_0$ ) es producida en la perforación central, en los subsiguientes tiempos ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ) la regresión los habrá alcanzado a una tasa de quemado fácilmente calculable.



**Figura 1.** Representación de quemado de un grano propelente [2]

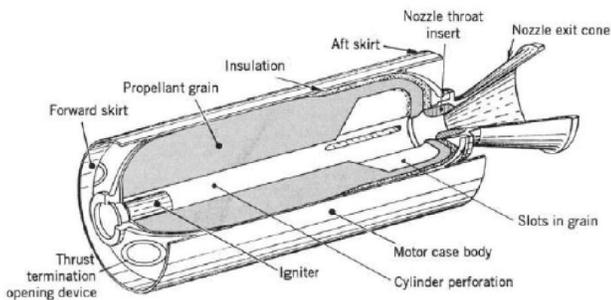
Dependiendo de cómo haya sido la configuración de grano escogida esta variará en la superficie expuesta al quemado, tiempo de consumo, flujo másico, presión interna y por consiguiente el empuje final del motor.

### III. CONFIGURACIÓN BÁSICA MOTOR COHETE

Como bien es sabido en el interior de un motor cohete están instalados todos los compuestos y piezas necesarias para un correcto funcionamiento, esto va desde el grano propelente, ignitor, inhibidor de calor hasta la tobera. Todas estas piezas son instaladas y selladas al momento de su fabricación, por consiguiente no hay piezas “móviles”, tanques de combustible, ni subsistemas propensos a fallar.

El gas extremadamente caliente producido por la combustión interna del propelente sólido es canalizado, a través del cono de convergencia de la tobera el cual al pasar por la garganta aumenta la velocidad, en este punto el gas es expulsado violentamente, mediante un cono de divergencia [3] generando empuje.

A continuación se presenta una gráfica con algunas de las piezas ubicadas dentro de un motor cohete tradicional:



**Figura 2.** Configuración de un motor cohete. [3]

El gas caliente se produce por la combustión en la superficie hueca del grano propelente (o carga). En la mayoría de los casos el grano está unido a la pared del case para evitar filtraciones de gas caliente a partes del grano no destinadas al quemado. Particularmente el diseño expuesto en esta tesis presenta una capa de inhibidor, el cual evita dicha filtración y daños de erosión por calor a la pared del case. [4]

### IV. CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

En comparación con un motor de combustible líquido los motores de combustible sólido son mucho más simple y los problemas de diseño son menores. No hay tanques extras, inyectores, bombas, ni sistemas de distribución. Los problemas de diseño son por lo general provocados por la selección errónea de los materiales aislantes, del case o por defectos en la manufactura. [3]

Al no haber tanques de combustible extras, la carcasa debe fungir de contenedor y cámara de combustión. En los cohetes sondas esto debe ser minuciosamente calculado, puesto que producto a su esbelta figura (diámetro reducido) no se pueden adherir reforzadores de estructura externo por consiguiente toda la tarea recae en las paredes del motor.

En este tipo de motores no existe un sistema de refrigeración como tal, esta importante labor recae en las capas de aislante térmico insertadas entre la pared del case y el grano. Por consiguiente, el espesor del inhibidor debe ser calculado tomando en cuenta la temperatura máxima soportada, producida por la combustión y tasa de erosión. Por lo tanto, se define como un sistema de refrigeración pasivo. [3]

Con respecto al empuje producido y la temperatura generada en la cámara de combustión no existe un sistema de control como tal, estos dos parámetros son previamente definidos en el diseño y todos los materiales están elegidos y calculados, a fin de resistir las altas temperaturas y generar el empuje necesario. El empuje es generado de forma continua hasta que se agota la carga.

En prototipos recientes de Misiles Balísticos Intercontinentales de Combustible Sólido rusos, se ha dado a conocer que se han desarrollado métodos de control de encendido/apagado del motor, pero esta tecnología sigue estando bajo prueba y no ha sido divulgada al público en general.

#### A. Diseño del Case

En comparación con los case de plástico reforzados con filamentos, los de acero tienen varias ventajas: mayor resistencia a cambios bruscos de temperatura, mayor resistencia a esfuerzos y son menos propensos a fallas. La cualidad de resistir altas temperaturas añade una ventaja intrínseca: menor cantidad de aislante y por consiguiente menor peso final del motor. Pueden estar almacenados a la intemperie durante mucho tiempo sin deteriorarse. Al ser el acero un material que resiste mejor el intenso calor generado, es necesario menor cantidad de inhibidores y por consiguiente hay más espacio para el grano propelente. [3]

#### B. Acero AISI 4140

En el mundo coheteril, los materiales compuestos poco a poco han ganado espacios en la fabricación de diversas partes y piezas pero en lo que corresponde a la fabricación de motores se sigue empleando diversos metales, entre los cuales figuran el aluminio y diversas combinaciones de aceros AISI.

Esto motivado principalmente al ambiente extremo presente en una cámara de combustión; altas temperaturas, alta presión. En la actualidad se fabrican motores cohetes de diversos materiales los cuales pueden ser: aluminio y acero. Teniendo en cuenta la alta temperatura generada en el interior del motor 3284 k (3010,85°C) fue descartado el aluminio, puesto que no soportaría el intenso calor y la presión generada. Por esta razón, para la realización del case motor se ha seleccionado como materia prima el acero AISI 4140, el cual es un acero especial revenido subsecuente del temple con aleación al cromo molibdeno lo que permite en su mayoría de los casos su aplicación sin necesidad de tratamiento térmico adicional. Otra característica importante es la alta resistencia al desgaste y al impacto, siendo utilizable a temperaturas de hasta 723k (450°C), sin perder su tratamiento térmico en circunstancias donde es fundamental una alta tenacidad y resistencia a la tracción. [5]

La primera cifra de la designación 4140, indica el tipo de acero (elemento de aleación principal), el segundo dígito indica el porcentaje (%) en peso aproximado del elemento de aleación principal (1%) y los dos últimos dígitos proporcionan el contenido medio de carbono en porcentaje (%) en peso (40%).

Es ampliamente usado en la fabricación de motores, engranes y vehículos de alta exigencia. También es extensamente usado en maquinarias y respuestas como árboles de transmisión, ejes de bombas, ejes de cardan, bielas, tuercas, cigüeñales, émbolos, pines, brazos de ejes entre otros. [5]

**Tabla 1.** Características mecánicas Acero AISI 4140

Estado de entrega	Revenido subsecuente al temple
Resistencia a la tracción	932 – 1128 MPa
Límite de Fluencia	687 – 823 MPa
Alargamiento	Mínimo 10%
Contracción	Mínimo 40%
Resiliencia	0.49 MPa
Dureza Brinell	312 HB

Dentro del mundo de la cohertería el aluminio es un material extensamente usado en la fabricación de case para motores cohetes, a continuación se inserta una tabla con las propiedades del aluminio y Acero AISI 4140 en la cual se pueden notar las ventajas prominentes de este último [6]:

**Tabla 2.** Propiedades del Aluminio vs Acero

Propiedad	Unidad	Aluminio	Acero AISI 4140
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	2,8	7,85
Max Temperatura	°C	660	500
Limite elástico	Mpa	280	415

Módulo de Young	GPa	68	205
Emisividad	(o a 1)	0,05	-----
Conductividad Térmica	W/(m·K)	210	42,6
Expansión Térmica	µm/(m·°C)	23	14,6
Difusividad Térmica	·10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s	8420	-----

*C. Parámetros iniciales para el diseño del motor*

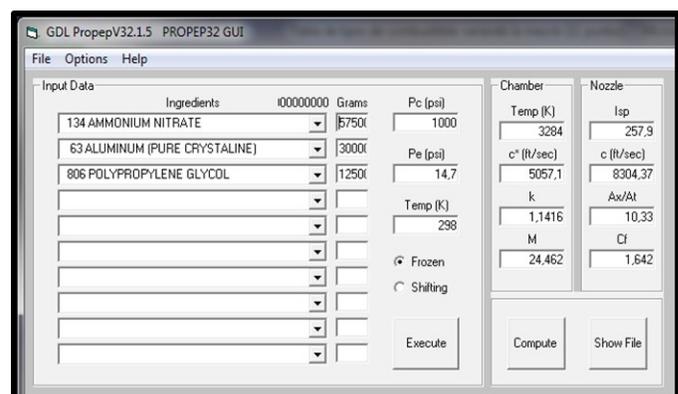
Para el diseño del case motor se tuvieron en cuenta una serie de parámetros, los cuales fueron establecidos para el posterior computo en el programa GDL Propep.

Entre los parámetros predefinidos para el diseño están:

- Pc: Presión de cámara, estipulada en 1000 psi (6,89 MPa) constante durante toda la combustión.
  - Pe: Presión externa, presión atmosférica a nivel del mar 14,7 psi (0,101 Mpa).
  - Temperatura ambiente 298 k (24,85 °c).
- Diámetro externo máximo: 0,18 m

Composición del grano propelente:

- Nitrato de Amonio: 575 gramos
- Aluminio Puro cristalino: 300 gramos
- Propilenglicol: 125 gramos



**Figura 3.** Parámetros introducidos en GDL Propep.

```

CODE          WEIGHT  D-H  DENS  COMPOSITION
134 AMMONIUM NITRATE 575.000 -1090 0.06230 4H 2N 3O
63 ALUMINUM (PURE CRYSTALLINE) 300.000 0 0.09760 1AL
806 POLYPROPYLENE GLYCOL 125.000 -1088 0.03610 52C 108H 17O

THE PROPELLANT DENSITY IS 0.06343 LB/CU-IN OR 1.7557 GM/CC
THE TOTAL PROPELLANT WEIGHT IS 1000.0000 GRAMS

NUMBER OF GRAM ATOMS OF EACH ELEMENT PRESENT IN INGREDIENTS
42.159771 H 6.464857 C 14.366380 N 23.663080 O
11.119348 AL

*****CHAMBER RESULTS FOLLOW*****

T(K)  T(F)  P(ATM)  P(P(SI))  ENTHALPY  ENTROPY  CP/CV  GAS  RT/V
3284. 5452. 68.02 1000.00 -762.75 2289.95 1.1416 35.437 1.920

SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL= 8.955 13.889
NUMBER MOLS GAS AND CONDENSED= 35.4372 5.4425

19.75192 H2 7.17700 N2 6.42602 CO 5.44240 A1203*
1.12644 H 0.71862 H2O 0.05779 A12O 0.05341 A1
0.03625 A1HO 0.03009 CO2 0.01704 HO 0.01655 A1H
7.51E-03 A1O 7.09E-03 CNH 4.01E-03 A1HO2 2.70E-03 NH3
1.28E-03 NO 8.11E-04 CHO 5.71E-04 O 5.46E-04 NH2
4.89E-04 A12O2 1.43E-04 N 1.37E-04 CH2O 1.36E-04 NH
7.83E-05 CH3 6.45E-05 CN 6.29E-05 CH4 4.35E-05 CNHO
2.99E-05 A1HO 2.80E-05 A12 1.07E-05 C2H2

THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS 24.462

*****EXHAUST RESULTS FOLLOW*****

T(K)  T(F)  P(ATM)  P(P(SI))  ENTHALPY  ENTROPY  CP/CV  GAS  RT/V
2265. 3617. 0.95 14.00 -1556.77 2289.95 1.1676 34.838 0.027

SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL= 8.563 11.940
NUMBER MOLS GAS AND CONDENSED= 34.8380 5.5594

20.47803 H2 7.18284 N2 6.43589 CO 5.55931 A12O3&
0.49070 H2O 0.22015 H 0.02829 CO2 0.00083 HO
3.45E-04 A1HO 1.52E-04 CNH 9.53E-05 NH3 8.21E-05 A1
3.46E-05 A1HO2 2.48E-05 NO 1.10E-05 A12O 1.03E-05 A1H

THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS 24.754
    
```

Figura 4. Resultados obtenidos del GDL Propep.

D. Diseño del case motor.

La estructura del motor de la primera etapa es un tubo donde el límite del espesor de pared  $e$  es impuesto por la presión esperada y el límite elástico del acero AISI 4140 [7]:

$$e = \frac{f \cdot d \cdot p}{2 \cdot \sigma} \tag{1}$$

Dónde:

- f = factor de seguridad
- d = Diámetro externo
- p = Presión interna
- $\sigma$  = Límite elástico
- e = Espesor de pared

Por lo cual nos arroja un espesor:

<i>f</i>	1,2	
<i>d</i>	0,18	m
<i>p</i>	6,89	MPa
$\sigma$	415	MPa
<i>e</i>	0,0018	m

Por consiguiente partiendo de un diámetro externo para el case motor de 0,18 metros se obtuvo un espesor pared de 0,0018 metros.

La teoría de membrana simple puede aplicarse para predecir el estrés aproximado en la cámara de combustión, esto asumiendo que no existe flexión en las paredes del case y que todas las cargas son tomadas en tensión. Para un cilindro simple de radio R y espesor e, con una presión de cámara p, el estrés tangencial es igual a [4]:

$$\sigma_{\theta} = pR/e \tag{2}$$

Y para calcular el estrés longitudinal se divide entre dos el estrés tangencial [4]:

$$\sigma_{\theta} = 2\sigma_l \tag{3}$$

Arrojándonos un estrés:

P	6,89	MPa
R	0,09	Metros
e	0,0018	Metros
$\sigma_{\theta}$	345,833	MPa
$\sigma_l$	172,916	MPa

E. Selección del inhibidor

Las altas temperaturas generadas por los propelente sólidos en la cámara de combustión hacen que sea fundamental la implementación de algún aislante térmico para contrarrestar los efectos de la alta temperatura sobre las paredes internas del case. El objetivo principal de estos materiales termorresistentes o inhibidores es evitar que las altas temperaturas de la cámara debiliten la integridad estructural del case, aunque el inhibidor realiza otras funciones secundarias:

- Reduce el peligro de quemado en superficies donde no se desea que haya contacto con el calor.
- Amortigua la tensión generada de la combustión sobre las paredes del case.
- Sella las uniones del case evitando la pérdida de presión y daños del calor generado.
- Guía el producto de la combustión en un flujo laminar hacia la garganta, lo cual evita la generación de ondas de choques en el cono de convergencia de la tobera.

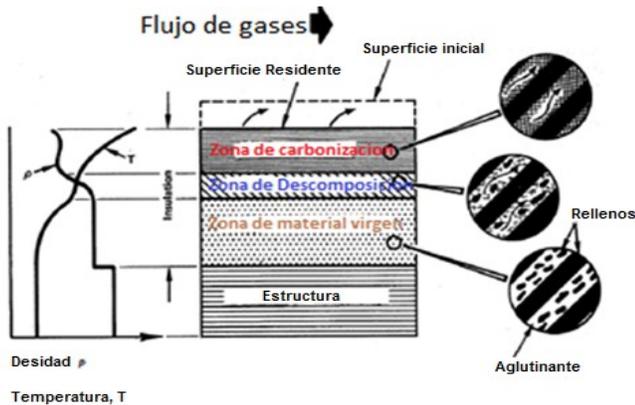
Muchos de los inhibidores usados fallan en algunos de los objetivos secundarios pero siempre y cuando sea cumplido el objetivo principal a total cabalidad, los diseñadores se las ingenian para modificar, reforzar o mejorar las piezas donde el inhibidor falló. [6]

Los inhibidores mayormente usados en la fabricación de motores o aislantes de cápsulas espaciales realizan su tarea, gracias a los mecanismos de ablación de los materiales con que están hechos, esto quiere decir que absorben el calor

mediante el cambio del propio estado físico-químico, el cambio es usualmente acompañado por la pérdida o degradación del material, el cual es conocido como erosión.

Generalmente el inhibidor está dividido en tres capas:

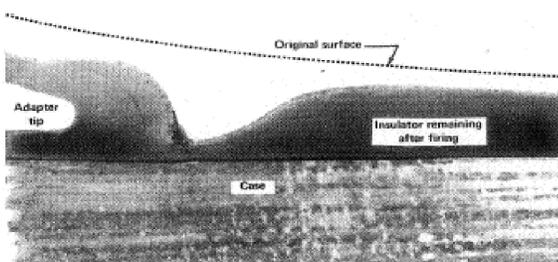
1. Zona de material virgen
2. Zona de descomposición
3. Zona de reacción.



**Figura 5.** Representación de las tres capas de inhibidor y por última la estructura del tanque de combustible.

Poco a poco que continúa el proceso de combustión la superficie del material es erosionado. En este punto es comúnmente usado el término “regresión superficial” para describir los modos de pérdida de la superficie expuesta a la alta temperatura. [6] Estos modos son los siguientes:

1. Efectos químicos:
  - Reacciones químicas de los componentes de la capa de carbonización con gases del propelente y partículas (fenómeno usualmente visto en propelentes químicos)
  - Reacciones de bajo la superficie (generalmente pirolisis)
2. Efectos físicos:
  - Erosión de la superficie debido al choque de partículas y esfuerzos de corte impuestos por la fricción de la piel.
  - Estrés térmico introducido por la transferencia de calor.
  - Debilitamiento superficial debido al estrés térmico y mecánico en la zona de carbonización y descomposición.



**Figura 6.** La línea punteada representa el nivel original del inhibidor antes del encendido, es visible la erosión provocada por la combustión en el inhibidor.

Teniendo en cuenta las características fundamentales de los inhibidores los parámetros de búsqueda y selección se basaron en dos puntos: Densidad y Temperatura máxima:

La densidad es un factor de suma importancia para la selección motivado a que se busca un material con la menor densidad posible y capaz de amortiguar los esfuerzos generados en la cámara de combustión.

La temperatura máxima del inhibidor, su importancia radica en la selección del material, debido a que su resistencia debe estar por encima al calor generado en la cámara de combustión.

Con base en estos dos parámetros se hizo una búsqueda de los inhibidores más usados en la aeronáutica (SLA-561V, EPDM, TRUFOC, PICA), cohetería (Alúmina, CCC, Grafito, Pirolítico), industria en general (Corcho, Lana de vidrio, Lana de roca) y algunos experimentales (fibra de coco).

**Tabla 3.** Representación de los materiales inhibidores según su densidad y temperatura máxima.

Material	Unidades (g/cm³)	Temperatura Máxima (°C)	Número en las gráficas
Asbesto	1,76	1700	1
Alúmina	1,6	1700	2
CCC	1,81	3650	3
Grafito Pirolítico	2,1	3650	4
Corcho	0,25	110	5
Lana roca	0,16	1100	6
Lana vidrio	0,014	450	7
Fibra de coco	0,11	210	8
Carbón Fenólico	1,42	1430	9
Sílice fenólica	1,75	1880	10
SLA-561V	0,272	708	11
EPDM	0,86	1550	12

<b>TRUFOC</b>	0,4	2000	13
<b>PICA</b>	0,32	1930	14



Figura 7. Representación de los materiales según sus densidades.

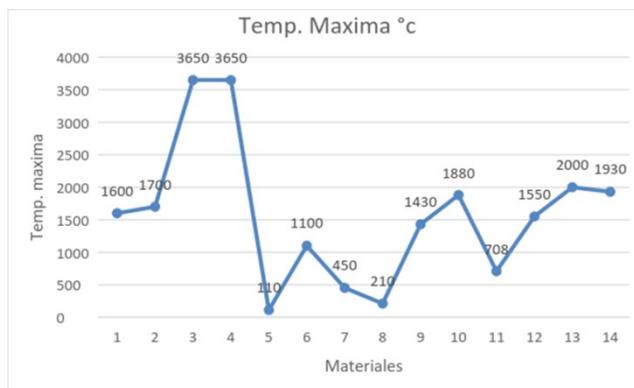


Figura 8. Representación de los materiales según la temperatura máxima soportada.

Con base en los datos observados en las gráficas de densidad y máxima temperatura, se seleccionaron cuatro materiales: Asbesto (1), Alúmina (2), CCC (3) y Grafito Pirolítico (4) los cuales presentan las mejores relaciones densidad/Max. Temperatura. Con estos materiales seleccionados se realizó una investigación más específica de todas las propiedades térmicas y mecánicas de cada material, las cuales fueron representadas en la siguiente tabla:

Tabla 4. Propiedades Térmicas y Mecánicas del Asbesto, Alúmina, CCC y Grafito Pirolítico.

Propiedad	Asbesto	Alúmina	CCC	Grafito Pirolítico
<b>Densidad</b> ( $g/cm^3$ )	1,76	1,6	1,81	2,1
<b>Max</b>	1600	1700	3650	3650

<b>Temperatura</b> (°C)				
<b>Límite elástico</b> (MPa)	42	200	300	80
<b>Módulo de Young</b> (GPa)	70	375	242	20
<b>Emisividad</b> (0 a 1)	0,8	0,68	0,95	0,97
<b>Conducción Térmica</b> (W/m·K)	40	35,4	101	190
<b>Expansión Térmica</b> ( $\mu m/m \cdot ^\circ C$ )	3,4	7,9	1,3	6
<b>Difusividad Térmica</b> ( $\cdot 10^{-7} m^2/s$ )	1,76	120	17	36

En el área de la cohetería, sobre todo en los cohetes sonda (Arcas, Súper Arcas) el Asbesto fue uno de los inhibidores más usado, motivado a que presenta baja densidad y resistencia media-alta a las altas temperaturas. Por muchos años el asbesto fue el material predilecto por los diseñadores de cohetes y aun en pleno siglo XXI muchos cohetes portadores como por ejemplo el del WikiSat sigue usando asbesto como inhibidor. [7] Pero investigaciones recientes han determinado varios efectos nocivos del asbesto, siendo clasificado como cancerígeno humano reconocido por el Departamento de Salud y Servicios Humanos de EEUU, por la Oficina de Protección Ambiental y la Oficina Internacional para la Investigación Del Cáncer. Según las investigaciones, la exposición al asbesto puede incrementar el riesgo de cáncer de pulmón y de mesotelioma (cáncer poco común del revestimiento delgado del pecho y del abdomen). Aunque es un cáncer de poca frecuencia, el mesotelioma es el tipo de cáncer asociado más comúnmente con la exposición al asbesto. Además del cáncer de pulmón y del mesotelioma, algunas investigaciones sugieren que existe una relación entre la exposición al asbesto y el cáncer colorrectal y el cáncer gastrointestinal, así como un riesgo mayor de padecer cáncer de garganta, de riñón, esófago y de vesícula biliar. [8]

Teniendo en cuenta los daños irreparables que puede causar al ambiente el asbesto y todos los daños verificados que genera en el cuerpo humano el autor de la tesis decidió dar por eliminado el uso del asbesto como material inhibidor, en aras de contribuir al desarrollo de un proyecto factible, en

salvaguarda de la salud del ser humano y en cuidado al ambiente. [1]

De esta forma, quedaron tres candidatas: Alúmina, CCC (Compuesto Carbón Carbón) y Grafito Piroclítico. Para la selección del inhibidor se tomaron en cuenta tres factores:

- Densidad: en este punto la Alúmina presenta a densidad más baja 1,6 g/cm<sup>3</sup> contra 1,81 del CCC y 2,1 del Grafito Piroclítico.
- Temperatura máxima: en este apartado el CCC y Grafito Piroclítico presentan una mejor resistencia al calor, ambos llegan al orden de 3650 °c quedando la alúmina en solo 1600 °c de resistencia.
- Expansión térmica: este tercer y último apartado considerado para la selección del material inhibidor es fundamental, debido a que un material con una alta expansión térmica generaría mayor presión sobre las paredes internas del case lo cual se busca evitar y al tener la Alúmina 7,9µm/(m·°C) contra 6 del Grafito Piroclítico y 1,3 del CCC quedó finalmente descartada del proceso de diseño.

Habiendo quedado descartada la Alúmina, quedaron dos posibles materiales a usar en la fabricación del inhibidor:

- Compuesto Carbono Carbón (CCC)
- Grafito Piroclítico

Cada uno de estos dos materiales presenta una idéntica resistencia al calor en el orden de los 3650 °c o 3923 k por lo que en este apartado ambos son similares. Considerando la densidad de cada material, el CCC presenta 1,81 g/cm<sup>3</sup> contra 2,1 g/cm<sup>3</sup> por lo cual el CCC es mucho más ligero que conlleva al beneficio de pesar considerablemente menos. Teniendo en cuenta la conductividad térmica de ambos materiales el CCC presenta 101 W/(m·k) contra 190 W/(m·k) del Grafito Piroclítico, demostrando que el CCC conduce en menor cantidad el calor, siendo ventajoso porque no se deben agregar capas extras de inhibidor, dejando más espacio para el tubo motor y reduciendo peso en la construcción final. Como último parámetro fue tomado la expansión térmica, en la que el CCC presentó la más baja de solo 1,3 contra 6 del Grafito Piroclítico. [1] Tomando en cuenta los parámetros antes expuestos y las ventajas del CCC en todos se procedió a la selección de este como el material para el diseño del inhibidor. En la Tabla 5, se muestran las características del CCC.

**Tabla 5.** Características físicas, térmicas y ablativas del Compuesto Carbono Carbón (CCC).

Propiedad	Compuesto Carbono Carbón (CCC)
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,81
Máxima Temperatura (K)	3923
Límite Elástico (MPa)	300
Módulo de Young (GPa)	242

Emisividad (0 a 1)	0,95
Conducción Térmica (W/m·K)	101
Expansión Térmica (µm/m·°C)	1,3
Difusividad Térmica (·10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)	17
Calor Específico (KJ/Kg·K)	1,3
Calor de Ablación (MJ/Kg)	2,7

### F. Diseño del Inhibidor

Como primer punto se debe calcular la Velocidad de Ablación (v<sub>a</sub>), esta depende de la temperatura de la cámara de combustión, de la temperatura de ablación del Compuesto Carbono Carbón (CCC) y del flujo de calor por unidad de área (α). [9]

$$\alpha = 6 e_h - 4 \cdot T_0^{0,3} \cdot m_s^{0,905} \tag{4}$$

Donde:

α = Flujo de calor por unidad de área

e<sub>h</sub> = Calor específico

T<sub>0</sub> = Temperatura cámara de combustión

m<sub>s</sub> = Densidad superficial

Por los cual:

Variable	Valor	Unidades
e <sub>h</sub>	1300	KJ/Kg
T <sub>0</sub>	3284	K
m <sub>s</sub>	3,25	Kg/m <sup>2</sup>
α	7668,27 0	J/(m·s)

La Velocidad de ablación (v<sub>a</sub>) se define como [7]:

$$v_a = \frac{\alpha(T_0 - T_a)}{Q_a \cdot \rho} \tag{5}$$

Donde:

- $v_a$  = Velocidad de ablación.
- $\alpha$  = Flujo de calor por unidad de área.
- $T_0$  = Temperatura en la cámara de combustión.
- $T_a$  = Temperatura de ablación.
- $Q_a$  = Calor de ablación.
- $\rho$  = Densidad del aislante.

Resolviendo:

Variable	Valor	Unidades
$\alpha$	7668,270	$J/(m \cdot s)$
$T_0$	3284	$K$
$T_a$	3923	$K$
$Q_a$	2700000	$KJ/Kg$
$\rho$	1810	$Kg/m^2$
$v_a$	-0,00100	$m/s$

Luego de haber calculado la velocidad de ablación, se procede a calcular el Espesor Piroлизованo, esta es la parte del inhibidor que queda quemada dentro del motor cohete [7].

$$e_p = 2 \sqrt{\frac{a \cdot t_{burnout}}{2}} \tag{6}$$

Donde:

- $e_p$  = Espesor Aislante Piroлизованo.
- $a$  = Difusividad térmica.
- $t_{burnout}$  = Tiempo quemado

Variable	Valor	Unidades
$a$	0,0000017	$m/s$
$t_{burnout}$	30	$s$
$e_p$	0,01009950 5	$m$

Para el cálculo del Espesor Aislante Térmico [7]:

$$e_t = \beta \cdot e_p \tag{7}$$

Donde:

- $e_t$  = Espesor aislante térmico.
- $\beta$  = Factor de seguridad.
- $e_p$  = Espesor Aislante Piroлизованo

Variable	Valor	Unidad
$\beta$	1,5	---
$e_p$	0,010099505	$m$
$e_t$	0,015149257	$m$

Una vez calculados la velocidad de Ablación, el Espesor Piroлизованo y el Espesor Térmico se procede a calcular la presión que va a generar el motor cohete [7]:

$$P_{burst} = \frac{2 \cdot e \cdot \sigma}{d} \tag{8}$$

Donde:

- $P_{burst}$  = Presión de quemado.
- $e$  = Espesor cámara de combustión.
- $\sigma$  = Limite Elástico.
- $d$  = Diámetro externo.

Variable	Valor	Unidades
$e$	0,0018	$m$
$\sigma$	415	$MPa$
$d$	0,1800	$m$
$P_{burst}$	8,2680	$MPa$

## V. CONCLUSIONES

En el área de diseño de cohetes el factor peso/empuje está estrechamente relacionado, por lo cual se buscan materiales compuestos que soporten cambios drásticos de temperatura, presión, en fin que resistan cambios muy bruscos de ambiente en cuestión de segundos sin sufrir fisuras o cualquier desperfecto físico.

Para tal objetivo fue seleccionado el tipo de Acero AISI 4140, puesto que el mismo presenta una serie de características ventajosas para la construcción de motores cohetes, entre las cuales destacan: alta resistencia a la tensión, resistencia a altas temperaturas, bajo nivel de alargamiento entre otros, estas características sumadas llevan a una menor

espesor en la capa inhibidora, lo que conlleva a menor peso requerido para la construcción y mayor peso de carga útil.

Partiendo de los parámetros iniciales para el diseño [9] entre los cuales destacan: Presión de cámara 1000 psi (6.89MPa), presión atmosférica de 14.7 psi (0,101 MPa), temperatura de combustión de 3284 K y diámetro externo de 0,18 m se obtuvo un espesor de 0,0018m, estrés tangencial 345,833 MPa y estrés longitudinal 172,916MPa que cumplen a cabalidad con los requerimientos iniciales en cuanto a presión.

A sabiendas que la temperatura máxima soportada por el acero AISI 4140 es de 723 k la cual es menor a los 3284 k generados por la combustión del propelente, se procedió a la selección del inhibidor en el que se fijaron como parámetros de selección: baja densidad (lo que genera menor peso en la construcción) y temperatura máxima soportada, que usando una menor cantidad de inhibidor se aisle al case de acero sin necesidad de tanto material, aligerando costos y peso. Con base en estos dos parámetros de selección fue elegido el Compuesto Carbono Carbón (C.C.C.) puesto que el mismo presenta resistencia máxima a temperaturas de 3923,15 k (3650°C), densidad de 1,81 ( $g/cm^3$ ) y a diferencia de otros inhibidores como el Asbesto no genera daños al ambiente y a la salud.

Posteriormente, la resolución de las fórmulas en la sección “diseño del inhibidor” arrojan una serie de resultados en velocidad de ablación, espesor aislante pirolizado, espesor aislante térmico que cumplen en totalidad con lo requerido para la resistencia a las altas temperaturas en la cámara de combustión.

En cuanto al cálculo de la presión generada en la cámara de combustión durante la ignición, esta arrojó una cifra de 8,268 MPa que es suficientemente tolerada por el case de acero porque el mismo tiene Resistencia a la tracción y Límite de Fluencia mucho mayor a la presión de quemado.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos a la UNEFA, ABAE, ULA, CIAE-TELEMAG, por haber aportado personal para la investigación y/o instalaciones para la realización de esta investigación.

#### REFERENCIAS

- [1] Prialè A. & Salazar T. (2016) Diseño preliminar de un cohete de combustible sólido de dos etapas con capacidad de carga útil para posicionar en órbita un nanosatélite de 1U o varios femtosatélites. (Trabajo Especial de Grado para optar al título de Ingeniero Aeronáutico) Universidad Nacional Experimental de la Fuerza Armada U.N.E.F.A., Caracas, Venezuela
- [2] Nakka R. Teoría Sobre Motores Cohete De propelente Sólido, URL <http://www.nakka-rocketry.net>
- [3] Sutton G & Biblarz O. (2001) Rocket Propulsion Elements, Wiley-Interscience Publication. EE.UU
- [4] Faria M. (2013) Internal Ballistics Simulation Of a Solid Propellant Rocket Motor (Trabajo de grado para obtener

- Titulo de Magister en Ingeniería Aeronáutica) Universidad Da Beira Interior, Covilhã, Portugal.
- [5] Da silva J. & Nunes J. (2001) Comportamiento a la Fatiga y Fatiga Corrosión del Acero AISI 4140 Recubierto por Termo-Rociado. (Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Ingeniero Mecánico) Universidad Central de Venezuela U.C.V., Caracas, Venezuela.
- [6] NASA. (1976) Solid Rocket Internal Insulation, NASA Space Vehicle Design Criteria (Chemical Propulsion), Ohio, EE.UU.
- [7] Trisancho J., Jové-Casulleras R. & Vera-Flores C. (2011) Technical constraints for a low cost femto-satellite launcher, 49th AIAA Aerospace sciences Meeting including the new Horizons Forum and aerospace exposition. AIAA 2011-546, Orlando, EE.UU.
- [8] Health T. (2013) Assessment of the Performance of Ablative Insulators Under Realistic Solid Rocket Motor Operating Conditions (Tesis para obtener el título PhD), Universidad de Pensilvania, Pensilvania, EE.UU.
- [9] Prialè A. & Salazar T. (2017) Estudio del desempeño de combustible sólido para el diseño de un cohete de dos etapas para posicionar Nanosatélites en órbita baja. Caracas, Venezuela.

# Un Análisis de los Sensores para la evaluación de la Enfermedad de Parkinson

## A Review of Sensors for Parkinson's Disease Evaluation

Raquel Torres<sup>1,2</sup>; Mónica Huerta<sup>3</sup>, Ricardo González<sup>4</sup>, Roger Clotet<sup>2</sup> and Juan Bermeo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional Bolivariana, Caracas, Venezuela.

<sup>2</sup>Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

<sup>3</sup>Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador

<sup>4</sup>Universidad Sergio Arboleda, Bogotá - Colombia

rtorres@unefa.edu.ve; mhuerta@ieec.org; rgonzalezricardo@gmail.com, clotet@usb.ve, jbermeo@ups.edu.ec

**Resumen**— En el diagnóstico y evaluación de la enfermedad de Parkinson (EP) los síntomas motores más frecuentes son: temblor en reposo, bradicinesia, alteraciones de la marcha y congelamiento o freezing. En los últimos años, varios tipos de sensores se han utilizado para cuantificar objetivamente estos síntomas en pacientes con EP. Este trabajo estudia y presenta un análisis comparativo de las principales características de sensores desarrollados para la adquisición de datos y medición de diferentes tipos de movimiento de forma continua en las actividades diarias de pacientes. Este trabajo también muestra la aplicación de sensores en una evaluación del temblor postural de las manos en un grupo de adultos jóvenes. El análisis indica que la medición de los trastornos motores, utilizando algún tipo de sensor del cuerpo y las tecnologías portátiles, marcan tendencia en el control de los síntomas de la EP.

**Palabras clave**—Movimiento Corporal, Sensores, Enfermedad de Parkinson.

**Abstract**— In the diagnosis and evaluation of Parkinson's disease (PD) the most frequent motor symptoms are: tremor at rest, bradykinesia, alterations of the March, and freezing. In recent years, various types of sensors have been used to objectively quantify these symptoms on PD patients. This work studies and presents a comparative analysis of the main characteristics of sensors developed for the data acquisition and measurement of different types of movement on an ongoing basis in the patient's daily activities. This work also shows the application of sensors in an evaluation of hand's postural tremor, on a group of young adults. The analysis developed indicates that the measurement of motor disorders, using some kind of body sensor and portable technologies set the trend in the monitoring of the symptoms of PD.

**Keywords:** Body Motion, Sensors and Parkinson's disease

## VI. INTRODUCCIÓN

La enfermedad de Parkinson (EP) es el segundo trastorno neurodegenerativo, después del alzhéimer, a escala mundial. Tiene una tasa de incidencia bruta de 4,5-19 por 100.000 personas al año [1]. La EP es una enfermedad causada por la reducción de las células dopaminérgicas dentro de la sustancia nigra del mesencéfalo, área central que controla el movimiento. Otra sustancia controlada por la dopamina es la acetilcolina. Si falta dopamina, hay un exceso de acetilcolina, responsable de los temblores y la rigidez muscular que aquejan a muchas personas con EP. Los síntomas motores más

frecuentes son el temblor de reposo, bradicinesia, alteraciones de la marcha y de los reflejos posturales, así como dificultad para iniciar o finalizar los movimientos voluntarios y congelamiento (FoG) [2][3].

En el caso particular de la EP los trastornos del movimiento en los pacientes son diagnosticados y evaluados subjetivamente por el neurólogo, basado en la Unified Parkinson's Disease Rating Scale (UPDRS) (Escala Unificada para la Evaluación de EP).

En los últimos años se han utilizado diferentes tipos de sensores para cuantificar objetivamente los síntomas de los pacientes con EP. En este artículo se presenta un análisis de los sensores desarrollados para la adquisición de los tipos de movimiento corporal característicos de quienes padecen la EP. También se presentan los resultados al evaluar el temblor postural de las manos de un grupo de adultos jóvenes, a través de un sistema basado con sensor de profundidad (Kinect V1.0), como primera fase en establecer un modelo comparativo en diferentes grupos de pacientes.

## VII. SENSORES UTILIZADOS PARA EL MONITOREO DE LA EP

Los sensores, desde la óptica de los sistemas microelectromecánicos, son utilizados para medir cantidades físicas que serán convertidas eventualmente en señales eléctricas [4]. En su diseño, los sensores miden cualquier variable física, como peso, aceleración, movimiento, presión, proximidad, profundidad, corriente eléctrica, temperatura, entre otros. Existen diferentes tipos de sensores: corporales (acelerómetros) o remotos (de profundidad, cámaras RGB-D o sistemas basados en reconocimiento de voz).

Los síntomas motores de la EP, como temblor, rigidez, bradicinesia, inestabilidad postural y congelamiento, se consideran relevantes al momento de establecer un sistema de monitoreo para pacientes con EP [5]. Para la adquisición de movimiento corporal se tiene una aproximación basada en acelerómetros que son generalmente adheridos, mediante bandas o cintas en la muñeca o tobillo [6][7][8][9] [10][11][12]. Otra aproximación, menos invasiva para el paciente, es el uso de sensores ópticos que monitorean el paciente sin que este deba llevar ningún sensor adherido a su cuerpo [13][14][15].

Los sistemas que monitorean la actividad humana con sensores que van colocados en el cuerpo, tienen una variedad de

aplicaciones [16]. En la tabla II se presenta un resumen de los dispositivos para el desarrollo de sensores utilizados en el monitoreo en pacientes con EP, tanto para síntomas motores como para síntomas no motores.

TABLA II

SENSORES UTILIZADOS EN EL MONITOREO DE PACIENTES CON EP

Síntoma de la EP	Dispositivos para seguimiento de síntomas de EP
Síntomas motores	- Sensores integrados en los teléfonos inteligentes
	- Acelerómetros
	- Giróscopos
	- Inclinómetros
	- Visión por computador
Síntomas no motores	- Sistemas para monitoreo de propiedades fisiológicas (Ej.: Respiración)
	- Sistemas de procesamiento de voz

El uso de sensores portátiles basados en acelerómetros ha establecido procedimientos de monitoreo, a fin de estimar la severidad de los síntomas de pacientes con EP [17][18]. Usando redes corporales [19], se colocan diversos sensores en el cuerpo del paciente de la forma menos invasiva posible y mediante comunicación inalámbrica se transmiten los datos a una computadora con un software específico de procesamiento para su evaluación. Su objetivo es que sea de fácil uso, bajo costo y que se pueda utilizar durante varios días.

Los inclinómetros permiten monitorear el freezing, el cual puede producir eventos de caída durante la caminata [20]. El desarrollo de aplicaciones en los teléfonos inteligentes adquiriendo las señales provenientes de los sensores internos, permiten registrar: movimiento, posición y entorno de quien los porta [21]. En los últimos años se ha incrementado el número de desarrollos y aplicaciones dirigidas a ayudar a los médicos especialistas en Parkinson [22][23]. El o los sensores ubicados en diferentes partes del cuerpo del paciente, como la cintura, la muñeca, el pecho, las piernas y/o la cabeza, se los denomina sensores corporales. Los sensores se colocan en la ropa o en accesorios de uso regular como relojes, lentes o teléfonos móviles [9][24].

La portabilidad, movilidad, consumo de energía, coste, almacenamiento de datos, además de precisión en el momento de captura de data, son los criterios más considerados para establecer una base comparativa entre sensores de movimiento corporal. Un resumen de la comparación de estos criterios se presenta en la tabla III.

Las redes de sensores corporales, Body Sensor Network (BSN), han ido ganando protagonismo los últimos tiempos gracias a las mejoras continuas de los sensores, una buena parte impulsada por la demanda que tiene el sector salud de monitorear los pacientes, debido a la mejora de la esperanza de vida y a los mayores índices de morbilidad en edades superiores a los 60 años [25]. Dichas redes permiten el monitoreo de síntomas de una persona, a través de sensores (externos o implantados) al cuerpo.

En los sistemas que monitorean síntomas de la EP, a los efectos de portabilidad y comodidad, debe tomarse en cuenta la ergonomía y donde se colocan el grupo de sensores, si van fijos al cuerpo del paciente por algún tipo de accesorio, a fin de evitar

daños por caídas u otro accidente. Debe tomarse en cuenta el peso de los dispositivos utilizados en el proceso de detección, considerando elementos ligeros. Entre estos elementos, el tipo de tecnología de la batería, el consumo y su tamaño, son desafíos que enfrentan los desarrollos en biosensores[26], más cuando se espera que sean capaces de operar sin necesidad de mantenimiento durante largos períodos de tiempo.

En la tabla IV se presenta un resumen de alimentación y baterías que utilizan algunos sistemas de sensores de movimiento corporal. Para el caso de aplicaciones en los que se utilizan los sensores de los teléfonos inteligente, el cálculo del consumo de energía dependerá del sistema operativo que utilice el dispositivo. Dependiendo del tipo de función que detecte diferentes estados de actividad del dispositivo (activo, inactivo, en espera, según sea el caso), habrá mayor o menor consumo de energía, según el proceso que realice el CPU del móvil.

TABLA III.

COMPARACIÓN ENTRE SENSORES DE MOVIMIENTO CORPORAL

Característica	Sensores portátiles basados en acelerómetro	Sensores NWR	Sensor de Captación de imagen (Kinect)
<i>Tamaño</i>	Mínimo aproximado de 5cm x 2cm x 2cm	14.5cm x 3.5cm x 3cm	28cm x 3.5cm x 6cm
<i>Portabilidad</i>	El sensor se coloca en uno o varios puntos del cuerpo del paciente.	El Wii remote es el sensor, lo debe tener en una de las manos	No requiere que el paciente lo lleve puesto al cuerpo ni en su mano, sin necesidad de utilizar un control o mando.
<i>Alimentación del sensor</i>	Usa baterías tipo pila de reloj o batería tipo AAA (dependiendo del modelo)	Usa dos baterías AA	No utiliza alimentación con baterías, usa adaptador USB para funciones básicas de energía.
<i>Características ambientales donde se instale</i>	Se colocan los sensores en el cuerpo o ropa del paciente.	El sensor lo debe tener en una de las manos	Entre el paciente y el sensor debe haber un mínimo de 3 mts de distancia
<i>Coste de adquisición</i>	\$ 80 aprox.	\$ 50 aprox.	\$ 150 aprox.
<i>Coste de mantenimiento</i>	Medio. En caso de pacientes con EP que deban manipular el sistema con Sensores basados en acelerómetros, corren el riesgo de dañarlo por propensión a caídas	Medio. En caso de pacientes con EP que deban manipular el sistema con Sensor NWR, corren el riesgo de dañarlo por propensión a caídas o que no logre sostenerlo	Bajo. Se deja instalado el sensor, solo de iniciar aplicación. En caso de pacientes con EP que deban manipular el sistema con Sensor Kinect, no corren el riesgo de dañarlo por riesgo a caídas o que no logre sostenerlo
<i>Transmisión de datos</i>	Conexión Bluetooth	Conexión Bluetooth	Usa adaptador USB para funciones básicas de transmisión de datos.
<i>Almacenamiento de datos</i>	Puede tener dispositivo de memoria externa MicroSD	Memoria interna de 5.5 Kbytes para ajuste de controles, mantenimiento y almacenamiento de data.	Se almacenan los datos directamente al PC
<i>Salida de la señal medida</i>	Requiere de aplicación, no necesariamente de sistemas abierto o no propietario	Requiere de aplicación, librerías disponibles	Requiere de aplicación, librerías disponibles, software liberado

TABLA IV  
SENSORES DE MOVIMIENTO CORPORAL Y TIPO DE ALIMENTACIÓN DEL SENSOR

Característica	Sensores portátiles basados en acelerómetro	Sensores de Teléfonos inteligentes	Sensores NWR	Sensor de profundidad (Kinect)
Alimentación del sensor	Usa baterías tipo pila de reloj o botón y AAA	Usa baterías recargables electroquímicas	Usa dos baterías AA	USB para funciones básicas de energía.
Batería que utiliza el sensor	Li-ion	Li-ion	Níquel-Cadmio	No utiliza alimentación con baterías. No requiere que el paciente lo lleve puesto al cuerpo ni en su mano
Portabilidad	El sensor se coloca en uno o varios puntos del cuerpo del paciente.	El teléfono se coloca en el cuerpo del paciente.	El Wii remote es el sensor, debe llevarse en una de las manos.	

### VIII. EVALUACIÓN DE TEMBLOR POSTURAL UTILIZANDO SENSOR DE PROFUNDIDAD (KINECT V1.0) EN UN GRUPO DE ADULTOS JÓVENES

La EP es una enfermedad que se presenta en pacientes con rango de edad superior a los 70 años, o vejez intermedia. Sin embargo, hoy día se observan casos de EP en pacientes con menor edad, que no es lo común para esta enfermedad.

De acuerdo a [27], se pueden establecer grupos y subgrupos por rango de edades según se indica en la tabla V:

TABLA V  
GRUPOS DE EDAD: TIPOS, SUBGRUPOS Y UMBRALES

Grupo	Subgrupo	Rango de edad (años)
Jóvenes	Infancia	0-5
	Niñez	6-14
	Adolescencia	15-19
Adultos	Adultos Jóvenes	20-39
	Adultos medios	40-49
	Adultos maduros	50-59
Viejos	Vejez inicial	60-69
	Vejez intermedia	70-84
	Vejez avanzada	85-en adelante

Con la finalidad de establecer un modelo en diferentes grupos de pacientes y sus edades, para formar una base comparativa sobre los signos motores para la evaluación de la postura con el uso de sensores, se consideró como primera fase la aplicación inicial de una prueba sobre una muestra de veintiséis (26) adultos jóvenes, en edades desde 20 a 31 años, sin patología, utilizando un sistema que consta de cuatro módulos [15]: el primero de adquisición del movimiento corporal del paciente con el sensor Kinect V1.0, el segundo módulo de extracción de característica para procesar la escena captada por el Kinect V1.0, el tercer módulo de reconocimiento del esqueleto y finalmente el módulo de tratamiento de datos adquiridos, que se desarrolla con una rutina en MatLab. En la figura 1, se muestra el procedimiento para evaluar el temblor postural con el sensor Kinect V1.0.

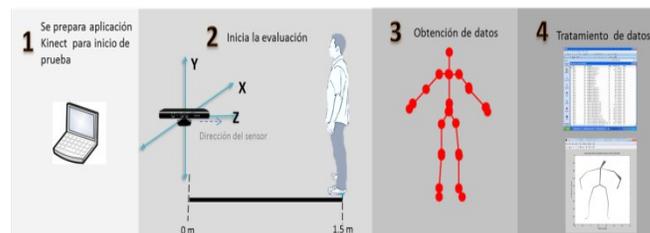


Figura 1. Evaluación del temblor postural con el sensor Kinect V1.

Con brazos extendidos y simulando el movimiento “cuenta moneda” que caracteriza a un paciente con EP, se realizó una medición con un sensor Kinect a 1,5 metros de distancia de cada uno de los voluntarios que formaron la muestra para el experimento, según se muestra en la figura 2.



Figura 2. Evaluación del temblor postural en manos con el sensor Kinect en adulto joven

### IX. RESULTADOS

Los datos adquiridos con el sensor Kinect V1.0 para la evaluación del temblor postural de las manos a un grupo de adultos jóvenes, se presentan en la tabla VI, representando el desplazamiento de las muñecas de los voluntarios evaluados en las figuras 3 a la 5.

Se observa que el menor desplazamiento de las muñecas se presentó en los voluntarios de 24 a 28 años de edad, en comparación con el resto del grupo muestra.

Figura 5. Desplazamiento de muñeca derecha en eje y (m)

X. DISCUSIÓN

Analizar la actividad humana, en particular la marcha, es un reto para los que desarrollan sistema de análisis de movimiento. En dichos sistemas, debe considerarse los parámetros que definan la velocidad a la que se produce el movimiento de la persona en observación, estudiando las características de los miembros del cuerpo junto a las articulaciones y con ellos se puede obtener un grupo de patrones que realicen comparaciones frente a un grupo de posturas consideradas normales y extraer esta información corporal para distinguir entre la aparición de una patología o la evolución de la misma.

A través del uso de sensores para adquisición de movimiento (acelerómetros, giróscopos, inclinómetros) o sensores de entorno, es posible llevar el seguimiento a los síntomas de Parkinsonismo de una persona. El desarrollo estará sometido a la propiedad del sensor para medir una determinada variable física y si se considera su uso en redes corporales e inalámbricas. Estas condiciones estarán supeditadas al consumo de energía, costo y potencialidades de portabilidad que tendrá el sistema sensor, en aras de facilitar la comodidad y calidad de vida de quien padece la EP.

El análisis presentado en este artículo establece que para medir los desórdenes motores, las redes de sensores corporales y las tecnologías portátiles marcan tendencia para el seguimiento y monitoreo de los síntomas en la EP. Los nuevos desarrollos sugieren que los sensores adaptados al cuerpo, tienen el potencial para enfrentar retos para monitorización continua en el domicilio del paciente, dando información sobre la calidad y la duración de las diferentes actividades diarias del paciente, tanto motora como no motora.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional, Venezuela, por el apoyo prestado en las experiencias con sensores 3D. Igualmente se agradece el soporte del proyecto CUENCA-EP de la Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

REFERENCIAS

- [1] W. H. Organization, Neurological disorders: public health challenges. World Health Organization, 2006.
- [2] L. M. De Lau and M. M. Breteler, "Epidemiology of Parkinson's disease," *Lancet Neurol.*, vol. 5, no. 6, pp. 525–535, 2006.
- [3] M. D. Djuric-Jovicic, N. S. Jovicic, S. M. Radovanovic, I. D. Stankovic, M. B. Popovic, and V. S. Kostic, "Automatic identification and classification of freezing of gait episodes in Parkinson's disease patients," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 685–694, 2014.
- [4] K. B. Lee, Principles of microelectromechanical systems. John Wiley & Sons, 2011.
- [5] D. H. Romero and G. E. Stelmach, "Changes in Postural Control with Aging and Parkinson's Disease," *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 22, no. 2, pp. 27–31, 2003.
- [6] Q. W. Oung et al., "Objective assessment of Parkinson's disease symptoms severity: A review," in Proceedings - 2015 2nd International Conference on Biomedical Engineering, ICoBE 2015, 2015.

TABLA VI  
DATA ADQUIRIDA CON EL SENSOR KINECT V1.0

Edad (años)	Género	Patología	mdx (m)	mdy (m)	mix (m)	miy (m)
20	M	Sin Patología	0,0665	0,1157	0,072	0,0749
20	M	Sin Patología	0,1285	0,0371	0,0286	0,0527
20	F	Sin Patología	0,0814	0,0022	0,0294	0,0266
22	M	Sin Patología	0,0114	0,1092	0,022	0,0921
22	M	Sin Patología	0,014	0,0664	0,0207	0,0411
22	M	Sin Patología	0,0932	0,0523	0,0132	0,0489
22	F	Sin Patología	0,0097	0,0321	0,0122	0,011
22	F	Sin Patología	0,1039	0,0924	0,0169	0,0179
23	F	Sin Patología	0,0169	0,0141	0,0229	0,0169
23	M	Sin Patología	0,0727	0,0153	0,0318	0,0161
24	M	Sin Patología	0,0458	0,0337	0,0381	0,0346
24	M	Sin Patología	0,0136	0,0257	0,0456	0,0085
25	F	Sin Patología	0,0546	0,0132	0,0365	0,0059
25	M	Sin Patología	0,0112	0,0119	0,0071	0,0041
25	M	Sin Patología	0,0132	0,0046	0,0042	0,0080
26	M	Sin Patología	0,0224	0,0172	0,0266	0,0150
26	M	Sin Patología	0,0124	0,0109	0,0344	0,0207
26	M	Sin Patología	0,0181	0,0015	0,0344	0,0052
26	F	Sin Patología	0,0432	0,0595	0,0138	0,0670
29	F	Sin Patología	0,0417	0,0172	0,0066	0,0064
29	F	Sin Patología	0,0502	0,0211	0,0178	0,0088
30	M	Sin Patología	0,0014	0,0088	0,0108	0,0161
30	M	Sin Patología	0,1339	0,1372	0,0824	0,0349
30	M	Sin Patología	0,0227	0,0548	0,0308	0,0233
31	F	Sin Patología	0,0322	0,1065	0,0801	0,1265
31	F	Sin Patología	0,0858	0,0188	0,0301	0,0117

mdx: desplazamiento en eje x muñeca derecha      mix: desplazamiento en eje x muñeca izquierda  
mdy: desplazamiento en eje y muñeca derecha      miy: desplazamiento en eje y muñeca izquierda

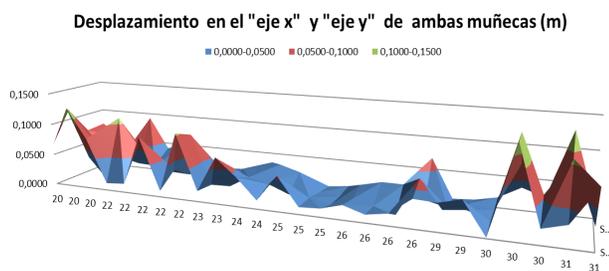


Figura 3. Desplazamiento de muñecas derecha e izquierda en eje x y en eje y

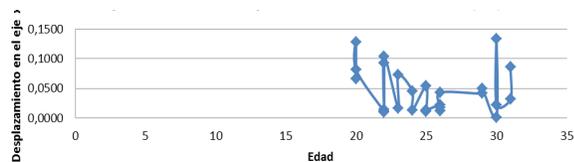
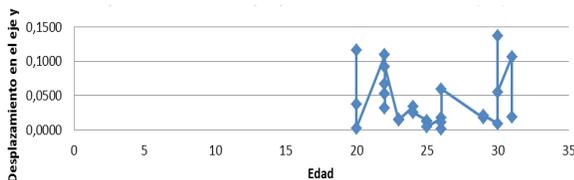


Figura 4. Desplazamiento de muñeca derecha en eje x (m)



- [7] "SHIMMER - TinyOS Wiki." [Online]. Available: <http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/SHIMMER>. [Accessed: 05-Mar-2017].
- [8] B.-R. Chen et al., "A web-based system for home monitoring of patients with Parkinson's disease using wearable sensors," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 58, no. 3 PART 2, pp. 831–836, 2011.
- [9] R. Contreras et al., "Tremors quantification in parkinson patients using smartwatches," 2016, pp. 1–6.
- [10] J. Synnott, L. Chen, C. D. Nugent, and G. Moore, "WiiPD-objective home assessment of parkinsons disease using the nintendo wii remote," *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, vol. 16, no. 6, pp. 1304–1312, 2012.
- [11] A. Bermeo, M. Bravo, M. Huerta, and A. Soto, "A system to monitor tremors in patients with Parkinson's disease," 2016, pp. 5007–5010.
- [12] M. Bravo et al., "An upper-limbs activities analysis of PD patients in OFF and ON state of medication," 2016, pp. 1–5.
- [13] R. Torres et al., "Diagnosis of the corporal movement in Parkinson's disease using kinect sensors," in *IFMBE Proceedings*, 2015, vol. 51, pp. 1445–1448.
- [14] R. Torres et al., "A kinect based approach to assist in the diagnosis and quantification of parkinson's disease," in *IFMBE Proceedings*, 2015, vol. 49, pp. 461–464.
- [15] R. Torres et al., "Analysis of corporal movement alterations using a 3D body tracking sensor," in *1st IEEE International Symposium on Systems Engineering, ISSE 2015 - Proceedings*, 2015, pp. 202–205.
- [16] L. Chen, J. Hoey, C. D. Nugent, D. J. Cook, and Z. Yu, "Sensor-based activity recognition," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 42, no. 6, pp. 790–808, 2012.
- [17] S. Patel et al., "Monitoring motor fluctuations in patients with parkinsons disease using wearable sensors," *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, vol. 13, no. 6, pp. 864–873, 2009.
- [18] R. LeMoyné, C. Coroian, and T. Mastroianni, "Quantification of Parkinson's disease characteristics using wireless accelerometers," in *2009 ICME International Conference on Complex Medical Engineering, CME 2009*, 2009.
- [19] E. Jovanov, A. Milenkovic, C. Otto, and P. C. De Groen, "A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation," *J. NeuroEngineering Rehabil.*, vol. 2, 2005.
- [20] M. D. Djuric-Jovicic, N. S. Jovicic, S. M. Radovanovic, I. D. Stankovic, M. B. Popovic, and V. S. Kostic, "Automatic identification and classification of freezing of gait episodes in Parkinson's disease patients," *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 22, no. 3, pp. 685–694, 2014.
- [21] "Desarrollo de aplicaciones de sensores en teléfonos y tabletas Android\* basados en el procesador Intel® Atom™ | Software Intel®." [Online]. Available: <https://software.intel.com/es-es/android/articles/developing-sensor-applications-on-intel-atom-processor-based-android-phones-and-tablets>. [Accessed: 05-Mar-2017].
- [22] N. Kostikis, D. Hristu-Varsakelis, M. Arnaoutoglou, C. Kotsavasiloglou, and S. Baloyiannis, "Towards remote evaluation of movement disorders via smartphones," in *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS*, 2011, pp. 5240–5243.
- [23] B. P. Printy et al., "Smartphone application for classification of motor impairment severity in Parkinson's disease," *Conf. Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Annu. Conf.*, vol. 2014, pp. 2686–2689, 2014.
- [24] J.-L. Reyes-Ortiz, L. Oneto, A. Ghio, A. Samá, D. Anguita, and X. Parra, "Human activity recognition on smartphones with awareness of basic activities and postural transitions," *Lect. Notes Comput. Sci. Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinforma.*, vol. 8681 LNCS, pp. 177–184, 2014.
- [25] M. Zhou, H.-X. Li, and M. Weijnen, *Contemporary issues in systems science and engineering*. John Wiley & Sons, 2015.
- [26] A. Pantelopoulou and N. G. Bourbakis, "A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.*, vol. 40, no. 1, pp. 1–12, 2010.
- [27] Los factores definitorios de los grandes grupos de edad de la población: tipos, subgrupos y umbrales Recuperada de <http://http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-190.htm>. Fecha de consulta: Marzo 2017.

# Sistema de control vehicular autónomo con controlador inteligente de tráfico de alta resolución

## Autonomous vehicle control system with intelligent high resolution traffic controller

Ing. Juan de D. Perea Arias

Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, UNEFA

insemca98@gmail.com

### RESUMEN

Radica en la instalación de un semáforo alimentado con una energía limpia, no contaminante y gratis, la cual proviene del sol y es recibida por un panel, que está conformado por una fina lámina con sus elementos químicos como el boro, fósforo y silicio, cuya función es transformar los fotones de los rayos solares y excitar los iones negativos o electrones que se encuentran impregnados en el semiconductor compuesto por los elementos químicos ya mencionados. Luego del panel se encuentra un equipo electrónico denominado regulador, que sirve para controlar y proteger el acumulador o batería, en donde se va almacenar el voltaje que alimenta a la carga o luminarias que conforman el semáforo. El sistema de control es dirigido por un Controlador Lógico Programable, en sus siglas en inglés (PLC), equipo que su función es regular el cambio de las luces (rojo, ámbar y verde), usando tecnología de punta, en comparación con los controladores o tarjetas existentes que ya cumplieron su vida útil y además no poseen una serie de funciones o salidas, para un mayor número de requerimientos que necesitan los semáforos.

### ABSTRACT

Involves the installation of a traffic light powered with a clean, non-polluting and free energy, which comes from the sun and is received by a panel that consists of a thin sheet with chemical elements such as boron, phosphorus and silicon, whose function is to convert the photons of sunlight and excite electrons or negative ions which are impregnated in the semiconductor comprising the aforementioned chemicals. After the panel is an electronic device called regulator, which serves to control and protect the accumulator or battery, where it will store the voltage supplied to the load or luminaries that make up the light. The control system is managed by a programmable logic controller (PLC), a team that their function is to regulate the change of lights (red, amber and green), using technology, compared with the drivers or existing cards already met life and they do not have a number of functions or outputs to a larger number of requirements that need traffic lights.

### I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo científico, tecnológico e innovador tiene por finalidad el enriquecimiento del saber sobre tópicos puntuales, que conllevan primordialmente a satisfacer necesidades del ser humano.

La idea de aprovechar la energía solar para fines prácticos en beneficio de la humanidad no es novedosa, sino que acompaña a la historia desde sus mismos comienzos. El sol, fuente inagotable de energía, ha sido siempre un aliado fiel con el que se contaba para vencer el frío.

En la actualidad; la estructura energética mundial se basa, en gran parte, en el consumo de las energías fósiles (carbón, petróleo y gas natural) y nuclear, dejando aparte las energías como la hidráulica, solar o eólica. Esta situación conduce a la emisión de gases de efecto invernadero, la generación de residuos sólidos y líquidos, el riesgo de accidentes graves y agotamiento de los yacimientos existentes.

A fin de no llegar a una situación insostenible, es preciso acudir a fuentes de energías alternativas, poner a punto la tecnología que aumente su eficiencia y crear los instrumentos sociales y políticos que favorezcan su viabilidad económica.

Con el desarrollo de esta tecnología se produce un ahorro considerable en el coste de la tarifa eléctrica, puesto que la fuente generadora de energía es directamente recibida del sol, fuente energética inagotable y no contaminante.

### II. Cálculo del Consumo Eléctrico Diario.

Con el objetivo de calcular el consumo eléctrico diario del prototipo de semáforo objeto estudio, se procedió a discriminar cada uno de los consumos de acuerdo al promedio de horas de uso de los dispositivos que conforman la carga del Sistema de Semaforización con un panel solar y dirigido por un PLC.

En la tabla (1), se presenta el consumo que representa la utilización del prototipo de Sistema de Semaforización con un panel solar y dirigido por un PLC, de acuerdo a esta se obtiene el consumo neto del Sistema, a partir de la sumatoria de los productos entre la potencia de cada elemento consumidor por el tiempo medio diario de funcionamiento de cada uno. Adicionalmente, se tiene en cuenta un 20% de factor de seguridad en el Sistema de Semaforización con un Panel Solar y Dirigido por un PLC, para disponerlo contra sobrecargas, por lo anterior el consumo diario queda de la siguiente manera:

$$\text{Consumo Teórico} = (2.472 \text{ Wh/día}) \times 1,20 = 2.966.20 \text{ Wh/día}$$

Sin embargo, no es suficiente con determinar el valor medio mensual del consumo diario en Wh para cada mes. Dado que los elementos del Sistema no son los 100% eficientes, se calcula un “consumo real” teniendo en cuenta las eficiencias de los distintos subsistemas y las pérdidas. Separando los consumos en Corriente Continua (CC) de los consumos en Corriente Alterna (CA), pues están afectados de factores de pérdidas distintos en el momento de realizar el cálculo del consumo real. Por consiguiente, se procede a calcular la energía real necesaria, la cual se calcula de la siguiente forma:

$$E_r = ECC / R + ECA / R \times \text{finv} \quad (1)$$

Donde:

ECC: Carga diaria de corriente continua.

ECA: Carga diaria de corriente alterna.

finv: Eficiencia inversor.

R: Rendimiento Global del sistema.

Teniendo en cuenta que este no es el consumo real del Sistema, dado que existen distintos factores tales como las pérdidas en el cableado, eficiencia de los equipos, se tiene en cuenta en la siguiente expresión, denominada rendimiento global del Sistema:

$$R = (1 - \Omega_b - \Omega_c - \Omega_v) \times (1 - \Omega_a \times N / Pd) \quad (2)$$

Donde:

$\Omega_b$ : Coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador: 0,05 en sistemas

que no demanden descargas intensas y 0,1 en sistemas con descargas profundas. Se determinó un “ $\Omega_b = 0,05$ ” debido a que el sistema no demanda descargas intensas.

$\Omega_c$ : Coeficiente de pérdidas en el convertidor: 0,05 para convertidores senoidales puros, trabajando en régimen óptimo y 0,1 en otras condiciones de trabajo, lejos del óptimo. Se determinó un “ $\Omega_c = 0$ ” debido a que en el sistema sólo presenta cargas de corriente continua, por lo tanto no es necesario el convertidor.

$\Omega_v$ : Coeficiente de pérdidas varias: Agrupa otras pérdidas como (rendimiento de red, efecto joule, etc.). 0,05 – 0,15 como valores de referencia. Se determinó un  $\Omega_v = 0,05$ , puesto que este agrupa las distintas pérdidas tales como rendimiento en la red, entre otras.

$\Omega_a$ : Coeficiente de auto descarga diario: “0,002 para baterías de baja auto descarga Ni-Cd”; “0,005 para baterías auto estacionarias de Pb-ácido” (las más abundantes); “0,012 para baterías de alta auto descarga” (Arranque de automóviles). Se determinó un “ $\Omega_a = 0.002$ ” debido a que el sistema requiere de una batería de Ni-Cd.

N: Número de días de autonomía de la instalación. Estos serán los días en que el sistema permanecerá con una baja o mínima irradiación (días nublados continuos). Por lo tanto, se consumirá más energía de la que el sistema será capaz de generar “ $N = 2$  días”.

**Pd:** Profundidad de descarga diaria de la batería: Esta profundidad de descarga no excederá el 80% (referida a la capacidad nominal del acumulador), porque la eficiencia de este decrece en gran medida con ciclos de carga –descargas muy profundas. Se determinó un  $Pd=75\%$ , debido a que esta no puede superar el 80% tomando en cuenta que la eficiencia del sistema de acumulación decrece con el tiempo.

Reemplazando los valores en la anterior ecuación se obtiene un rendimiento global del sistema de  $R=0,888$ . Y debido a que solo se trabajó con cargas DC, entonces toma la forma:

$$Er = ECC/R \quad (3)$$

$$Er = 2.966.20/0.888$$

Al sustituir los valores obtenidos para la carga de corriente continua y el rendimiento global del sistema de la anterior ecuación, se obtiene que la energía del sistema sea:

$$Er = 3.340.32Wh$$

### 1. Cálculo del Generador Fotovoltaico (Panel Solar).

El dimensionamiento del generador fotovoltaico (panel solar) es realizado una vez se conoce el total de la demanda energética que requerirá el sistema, es dimensionado a partir de la siguiente ecuación, la cual nos brinda la cantidad de módulos fotovoltaicos que se requieren y posteriormente determinará la necesidad de agrupar el o los módulos en serie o en paralelo.

$$NT = Er / PgxPpxHPS \quad (4)$$

Donde:

**NT** = Número total de módulos fotovoltaicos (paneles solares).

**Er** = Energía requerida por el sistema.

**Pp** = Potencia pico del módulo (W/KW/m<sup>2</sup>).

**Pg** = Factor de pérdidas.

**HPS** = Horas de pico solar.

Considerando una potencia pico del módulo de “ $Pp=220\text{ W}$ ”, la energía requerida por el sistema de “ $Er=???$ ” Y aplicando un factor de pérdidas del 90% donde “ $Pg=0,9$ ”. Se obtiene de la ecuación un número de paneles de:

$$NT = 3.340.32/0,9 \times 220 \times 7$$

$$NT = 2.42 \approx 3 \text{ paneles solares}$$

### 2. Cálculo del Sistema de Acumulación del Prototipo de Semáforo con un Panel Solar y Dirigido por un PLC.

Para definir la acumulación de una batería se requieren tres (3) características: la cantidad de energía que almacena, la máxima corriente que puede entregar (descarga) y la profundidad de descarga que puede sostener. La cantidad de energía que se acumula por una batería está dada por el número de watt-horas (Wh) de la misma. La capacidad (c) de una batería de sostener un régimen de descarga está dada por el número de amperios-horas (Ah).

- Valor en Wh: Para una batería dada, el número de Wh se calcula multiplicando el valor del voltaje nominal por el número de Ah, es decir:  $Wh = \text{Voltaje nominal} \times Ah$ .
- Valor en Ah de una batería: El número de Ah de una batería es un valor que se deriva de un régimen de descarga especificado por el fabricante. Para un tipo especial de baterías llamadas solares, el procedimiento de prueba ha sido estandarizado por la industria. Una batería, inicialmente cargada el 100% es descargada a corriente constante, hasta que la energía en la misma se reduce al 20% de su valor inicial. El valor de esa corriente de descarga, multiplicado por la duración de la prueba (20 horas es un valor típico), es el valor en Ah de esa batería. Un ejemplo práctico servirá para reforzar este concepto. Si una batería solar tiene una capacidad (c) de 200 Ah para un tiempo de descarga de 20 horas, el valor de la corriente durante la prueba es de 10 A. Significa el valor en Ah: Existe la tentación de extender este concepto para corrientes de descarga “en exceso” del máximo determinado por el método de prueba (10 A en nuestro ejemplo). La batería de nuestro ejemplo no puede entregar 200 A durante una hora.

El proceso electroquímico no puede ser acelerado sin que la batería se incremente su resistencia interna en forma sustancial. Este incremento disminuye el voltaje de salida, autolimitando la capacidad de sostener corrientes elevadas en la carga. Si la corriente de descarga es menor que la especificada, digamos 5 A, la relación Ah es válida. La batería de 200 Ah de nuestro ejemplo sostiene este valor de corriente por 40 horas.

- Corriente como valor fraccional: Los fabricantes de baterías expresan el valor de la corriente de carga (o descarga) como un valor fraccional de su capacidad en Ah. En nuestro ejemplo,  $C/20$  representa 10 A y  $C/40$  representa un valor de 5 A. Esta forma de dar el valor de la corriente de descarga (o carga) parece arbitraria, pero no lo es si recomendamos que la capacidad en Ah de una batería, por definición, requiere un número

específico de horas de descarga. Si la batería solar de nuestro ejemplo tiene un voltaje nominal de 6 voltios, la cantidad de energía que puede ser acumulada es de:  $6V \times 200Ah = 1200\text{ Wh}$  (1.2 KWh).

- Profundidad de descarga: La profundidad de descarga (PD) representa la cantidad de energía que se extrae de una batería. Este valor está dado en forma porcentual. Si la batería del ejemplo entrega 600 Wh, la profundidad de descarga (PD) es del 50%, cuando se efectúa la prueba para determinar la capacidad en Ah de una batería solar la profundidad de descarga PD alcanza el 80%.

En conclusión, para determinar el dimensionamiento del Sistema de acumulación o baterías se utilizaron dos importantes criterios. En primera instancia se concibe, “la máxima profundidad de descarga”, la cual establece el nivel máximo de descarga que se le permite a la batería antes de la desconexión del regulador, con el fin de proteger su duración, un valor adecuado para baterías de plomo-ácido es de 0,7. En segunda instancia se conciben los días de “autonomía”, por medio de los cuales se establece el número de días consecutivos que en ausencia del sol, el sistema de acumulación es capaz de atender el consumo, sin sobrepasar la profundidad de descarga de la batería.

La capacidad de almacenamiento de las baterías es la cantidad de energía que debe almacenar, para asegurar los días de autonomía, para esto se utilizan las siguientes expresiones en vatios hora (Wh), como en amperios hora (Ah), asumiendo un voltaje de la batería de 12 voltios.

$$Cn(Wh) = Er \times N / Pd \quad (5)$$

$$Cn(Wh) = 3.340.32 \times 2 / 0.7$$

$$Cn(Wh) = 9.543.77wh$$

$$Cn(Wh) = 9.543.77wh$$

**ISCT:** Corriente de corto-circuito generada por el generador fotovoltaico o panel solar.

$$Cn(Ah) = Cn(Wh) / Bat \quad (6)$$

$$Cn(Ah) = 9.543.77wh / 12V$$

$$Cn(Ah) = 795.3 Ah$$

Donde:

**Cn(Wh):** Capacidad nominal del sistema en (Wh o Ah).

**Cn(Ah):** Capacidad nominal del banco de baterías en Ah.

**N:** Días de autonomía.

**Pd:** Profundidad de descarga.

**VBat:** Tensión nominal de las baterías.

Teniendo en cuenta que el prototipo de Sistema de Semaforización con un Panel Solar y Dirigido por un PLC, tendrá una autonomía de dos (2) días y una profundidad de descarga del 70%, donde “ $Pd=0.7$ ”, se obtiene de la ecuación anterior, que la capacidad nominal del Sistema es igual a: 9543.77wh y la capacidad del banco de baterías es igual a 795.3 Ah.

Ahora bien, con el fin de garantizar la corriente del Sistema y su máxima profundidad de descarga, se determinó para este diseño que las baterías deben ser de 12 V a 1000 Ah, y según la capacidad del prototipo del Sistema de Semaforización con un Panel Solar y Dirigido por un PLC, se concluye de la siguiente ecuación que se requieren un número de baterías de iguales características, en su totalidad son:

$$TBAT-PARALELO = Cn(Ah) / 1000 Ah$$

$$TBAT-PARALELO = 795.3 Ah / 1000 Ah$$

$$TBAT-PARALELO = 0.795 \approx 1 \text{ batería de } 1000 Ah$$

### 3. Cálculo del Regulador

Debido a que su funcionalidad principal es controlar el proceso de carga y descarga de las baterías, su dimensionamiento se determinó, tomando en cuenta dos criterios fundamentales, los cuales son la corriente máxima que circulará por el Sistema, de acuerdo a las especificaciones del CEN, NTC 2050, IEEE, y la corriente que consume la carga en su condición menos favorable. En este sentido, se procede a determinar la corriente de corte a la que debe actuar el regulador y es fijada por el propio dispositivo, pero ha de soportar la máxima posible que la instalación produzca, mediante las siguientes expresiones:

$$ISCT = ISCN \times NR \times FS \quad (7)$$

$$\text{Siendo: } ISCT \downarrow \text{ Inom\_con}$$

Donde:

**ISC:** Corriente de corto-circuito producida por cada rama en paralelo del generador.

**NR:** Número de ramas en paralelo del generador.

**FS:** Factor de seguridad establecido por la norma.

**Inom\_con:** Corriente nominal del controlador de carga.

De la ecuación anterior se determina la variable "ISC", considerando una rama en paralelo y un factor de servicio del 1.25, por consiguiente se obtiene un valor de:

$$ISCT = 7.96 \times 1.25 = 9.95 \text{ A.}$$

Conforme a las especificaciones de consumo del semáforo bajo estudio, presentado en la tabla N° 1 se obtiene la intensidad de pico, en el evento en que toda la carga este en servicio y está dada por:

$$IPS = (7A) \times 1.25 = 8.75 \text{ A.}$$

Para el dimensionamiento del controlador se debe tomar la corriente mayor, ya sea la producida por el generador fotovoltaico, o la máxima que demande la carga; se infiere de lo anterior que la corriente de corto circuito del generador es mayor a la corriente pico demandada por el Sistema, por lo que se opta por tomar la mayor para dimensionar el controlador de carga.

Teniendo en cuenta el diseño realizado, es seleccionado el controlador de carga de referencia 12 Voltios, 10 Amperes, Solar Charge Controller, marca SUNFORCE. Con las siguientes especificaciones presentadas a continuación:

Voltaje de operación: 12 V – 14 V.

Corriente de operación: 10 A.

Rendimiento de pico: 97%

De acuerdo a las especificaciones del dispositivo la corriente nominal de este cumple con la requerida en el diseño donde  $ISCT = ISC \times NR \times FS$  Siendo:  $ISCT$ ,  $Inom\_con$ , y con los parámetros establecidos por el CEN para el controlador de carga:

$$ISCT = 9.95 \text{ A} \quad Inom\_con = 10 \text{ A}$$

#### 4. Cálculo del Calibre de los Conductores según el Código Eléctrico Nacional (CEN).

Para determinar el dimensionamiento de los conductores se tienen en cuenta la capacidad de corriente de los conductores y la corriente nominal, o el ajuste del disparo de los dispositivos de protección contra sobrecorriente, considerando que en un circuito de un Sistema Solar Fotovoltaico no debe ser menor al 125% de la corriente calculada de acuerdo con el Código Eléctrico Nacional (CEN). Tomando en cuenta ese factor de seguridad establecido por la norma se proceda a calcular las capacidades de corriente de los conductores que interconectan cada uno de los elementos del Sistema como la muestra el diagrama de la topología con conexión centrada en el controlador de la figura 21, y es posible determinarlos utilizando la siguiente ecuación:

$$S = 2 * L * IT * @con / \Delta V \quad (8)$$

Dónde: Área transversal del conductor ( $mm^2$ ).

L: Longitud del conductor en el Sistema (m).

IT: Corriente a circular por cada conductor del Sistema (A).

$\Delta V$ : Caída de tensión (V).

@con: Resistividad eléctrica del conductor ( $\Omega * mm^2/m$ ).

Antes de realizar el dimensionamiento de los conductores, es necesario calcular el porcentaje de regulación de la caída de voltaje máximo del Sistema el cual no debe ser mayor al cinco 5%, desde los módulos fotovoltaicos hasta la carga, según el Código Eléctrico Nacional (CEN).

Se considera según lo anterior una longitud sobredimensionada de treinta (30) metros desde los módulos fotovoltaicos hasta la carga (luces), según tabla del CEN se escogió un calibre del conductor N° 14 de cobre a corriente continua y temperatura a 60°, equivalente  $3\Omega/1000$ pies.

Donde  $I_{pie} = 0.3048$ metros, entonces  $30 \text{ metros} = 98.425$ pies, la resistencia eléctrica será:  $R = 0.2953\Omega$ , tenemos un voltaje que generan los módulos fotovoltaicos de doce (12) voltios y una potencia consumida por la carga de diez (10) vatios, la intensidad o corriente es la siguiente:  $I = 0.5A$  amperios.

Con estos datos calculados se obtiene la caída de voltaje, siendo:  $ER = 0.15$  voltios, entonces  $VR = 12V - 0.15V = 11.85V$ , se considera una pérdida del voltaje muy bajo, el porcentaje de regulación de la caída de voltaje es el siguiente:  $\%V = 1.26\%$ .

Se cumple con la normativa estipulada por el CEN, la cual no debe ser mayor al cinco (5) % de la caída de voltaje, con la escogencia de este calibre del conductor N° 14, es más que suficiente el grado de seguridad para la instalación eléctrica de todo el sistema, además los demás circuitos como de los módulos fotovoltaicos al regulador, del regulador al banco de baterías y del banco de baterías a la carga (luces), las distancias son mínimas y se desprecia, el anterior cálculo del porcentaje de la caída de voltaje desde de los módulos fotovoltaicos

hasta la carga (luces) cumple con la confiabilidad y seguridad esperada, por lo tanto no es necesario realizar el dimensionamiento de los conductores.

#### 5. Selección del Sistema Controlador Lógico Programable (PLC).

Un PLC o Controlador Lógico Programable es un aparato electrónico digital que utiliza una memoria programable donde almacena instrucciones para implementar funciones específicas tales como lógicas, secuencias, temporizaciones, conteos y operaciones aritméticas para controlar máquinas y procesos. Una aplicación corriendo en un PLC puede ser interpretado como un tablero electromecánico convencional o una cantidad de relés, temporizadores y contadores en su interior, solo que ahora estos elementos serán simulados electrónicamente y entonces comienzan a aparecer unas amplias ventajas como son:

- El conexionado de estos elementos no se hará con cables sino en su gran mayoría mediante el programa, con la consecuente disminución de la mano de obra y tiempo de cableado.
- En los contactos programables, realizados por la lógica del PLC no hay posibilidad de contactos sucios o bornes flojos, lo que lleva el mantenimiento a una mínima expresión.
- Al no tratarse de un equipo dedicado exclusivamente a una aplicación, es posible adecuarlo a cualquier configuración de intersección de vías en semáforos con solo desarrollar el programa adecuado.
- Soportan sin problemas ruidos eléctricos, magnetismo, vibraciones y no necesitan de un ambiente especialmente acondicionado para funcionar.
- El equipo Controlador Lógico Programable a utilizar es totalmente electrónico y de la más moderna tecnología, donde secuencialmente se incluyen microprocesadores de última generación de firmas comerciales reconocidas.
- Las especificaciones técnicas del equipo están fundamentadas según la necesidad o aplicación para controlar, semáforos a LEDS inteligentes vehiculares y señalización luminosa programable.
- El equipo tiene todas las tarjetas electrónicas correspondientes a salidas de potencia y control diseñadas con una arquitectura modular que permita ampliaciones futuras en la capacidad de señalización.
- Dispone de conectores construidos bajo normas reconocidas y de alta confiabilidad y flexibilidad en la operación.
- En todos los modos de funcionamiento es posible parametrizar el estado de todos los sólidos en forma independiente y poseen indicación visual del estado de funcionamiento de los mismos.

Adicionalmente también se protegerá contra fallas transitorias de línea de alta frecuencia, con sistemas automáticos de conexión y reconexión cuando la tensión de alimentación exceda los límites máximos y mínimos admitidos, implementando, al reiniciar el funcionamiento, una rutina de seguridad que impida que ocurran accidentes.

El mantenimiento cuenta con rutinas de autodiagnóstico y diversos test de operación para ayudar al técnico en la detección y despeje de problemas durante el montaje y el mantenimiento posterior del equipo y se emplearán borneras seccionales apropiadas y terminales en los conductores que estarán debidamente identificados.

En la programación la parametrización del controlador será sencilla y bajo ambiente Windows. De igual manera, la programación se podrá realizar desde un computador personal PC o Laptop. El supervisor de voltaje de este equipo se encarga de permitir el paso de la señal de alimentación únicamente si esta señal está dentro del rango permitido, es decir, un interruptor condicionado a la señal. Este supervisor tiene un rango de  $\pm 20\%$  sobre el voltaje utilizado, si la acometida no se encuentra en este rango no se energizará el equipo y enciende un led rojo dando la información si tiene bajo o alto voltaje. Cuando cerramos el interruptor principal, antes de energizar el PLC, toma una lectura del voltaje de la acometida  $\pm 3$  minutos y procede según la condición.

Se analizaron y compararon los diferentes tipos de controladores lógicos programables existentes en el mercado para el sistema de semaforización como son: Allen Bradley, Siemens, Mitsubishi, Telemecanique, Fanuc, Vipa, Festo, General Electric, Hitachi entre otros y se procedió a la selección, teniendo en cuenta ciertos factores, los cuales se tomaron en cuenta a continuación: En primer lugar, la selección del tipo de software a ser utilizado, siendo el escogido un software abierto (software libre) y la cantidad de ventajas anunciadas anteriormente, principalmente la escogencia del voltaje y amperaje en DC,

cantidades de salidas para el aprovechamiento del mayor número de funcionalidades, donde el equipo tiene la particularidad de adicionarle módulos de expansión y así se hace extensible el número de salidas, costos, entre otros. El seleccionado fue: Un PLC marca FATEK FBs-32MARU, con una alimentación de 12 voltios en DC. Ver figura (1)

**FIGURAS Y TABLAS**



Figura (1). Perspectivas del PLC a utilizar. Perea (2.017).

- Se debe contar con la asesoría del personal técnico calificado, especialmente para el diseño, construcción y manejo del equipo, puesto que al tratarse de una unidad generadora de energía y se encuentra al aire libre soportará las inclemencias del tiempo, como altas temperaturas, lluvias corrosión, entre otras, que podrían ocasionar graves accidentes en caso de descuido o negligencia.

- Tener especial cuidado en las conexiones eléctricas, debido a que una mala conexión resulta en daños o mal funcionamiento del equipo. En el PLC, se corre el riesgo de arruinar este dispositivo en caso de que se sobrecarguen las protecciones.

- Se debe realizar un mantenimiento periódico que garantice la vida útil de este equipo. Esto comprende la revisión y comprobación de sus partes, análisis de sus conexiones eléctricas, entre otros.

-Deberían seguir realizándose más proyectos en el área de Automatización Industrial, siempre innovándose las temáticas, con el fin de generar tecnología en el país. Estos temas debían enfocarse a otros tipos bien sea en la parte de seguridad o alumbrado de calles y avenidas.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Algunas de las referencias bibliográficas a utilizar se enumeran a continuación:

1. **LluisJutglar**. *Energía Solar*, Barcelona (España), Ediciones Ceac, 2004.
2. **Omar Guillén Solís**, *Energías Renovables Una Perspectiva Ingenieril*, México 2004.
3. **La luz del Alba, FUNDELEC**, *Energía Solar* (sembramos luz en Venezuela), 2008.
4. **Hugs, W.L., et al**, *Energy for Rural Development*, National Academy of Sciences, USA, 1976.
5. **Merrigan, J.A.**, *Sunlight to electricity. Photovoltaic Technology and Business Projects*. 2nd. Edition. The MIT Press, USA, 1982.
6. **Morales Acevedo, A.**, *La Electricidad que viene del Sol: Una Fuente de Energía Limpia*, CINVESTAV, IPN, en prensa, México, 1996.
7. **Sandia National Laboratories**, *Maintenance and Operation of Stand-Alone Photovoltaic Systems*. Albuquerque, N.M., December 1991.
8. **Gamboa, S., Sebastián, P.J.**, *Conversión de Cde. Electro depositado a p-Cde. por Telurización empleando CVTG*, Asociación Nacional de Energía Solar, XIX Semana Nacional, México, 1995.
9. **Jorge M. Tirabasso**, *Introducción a la Programación de PLCs*, mayo 2011.
10. **Ministerio de Planificación y Cooperación (MIDEPLAN)**, *Recomendación para el diseño del espacio vial urbano*, Santiago de Chile, 1998.
11. **Perea Arias, J. (4-9-2011)**, Ingenio de semáforo solar presentado en el INCES por el Ing. Juan Perea, Publicado por el diario PANORAMA, página Ciudadanos N° 3.



Figura (2).Presentación del prototipo de semáforo Solar en el INCES MARAIBO. 4/09/2011.

Equipo	Cantidad	Consumo (w)	Horas de uso c/u	Total (wh)
LUCES	6	10	24	1.440
PLC	1	36	24	864
Regulador	1	5	24	48
Conductores	6	2	24	48
<b>Sub. Total:</b>				2472
<b>20% Reserva:</b>				494,20
<b>Total:</b>				2.966,20

Tabla (1). Especificación de consumo del prototipo de semáforo. Perea (2.017).

Agradecimiento al Ing. Melvis Reyes, por su valiosa colaboración.

**RECOMENDACIONES**

# GUÍA PRÁCTICA DE LA ASIGNATURA ANTENAS CON LOS RECURSOS DISPONIBLE EN EL LABORATORIO DE LA UNEFA CORO.

*Keywords: Practical Guide, resources, curricular unit*

## Practical guide to the subject antennas with the resources available in the laboratory of UNEFA Coro.

Ángel Jesús Barrera,<sup>1</sup> Jesús Enrique BrachoVelasco,<sup>2</sup>

Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, UNEFA,<sup>1</sup>

Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada, UNEFA,<sup>2</sup>

Coordinación de Telecomunicacion<sup>1</sup> Coordinación de Telecomunicacion<sup>2</sup>

[angelbarrera91@gmail.com](mailto:angelbarrera91@gmail.com)<sup>1</sup>, [jebracho@gmail.com](mailto:jebracho@gmail.com)<sup>2</sup>,

**RESUMEN** — El trabajo de investigación titulado **Propuesta de una Guía Práctica de la Asignatura Antenas con los recursos disponibles en el laboratorio de la Unefa Coro**, busca realizar un material didáctico de carácter práctico, a los estudiantes de Ingeniería en Telecomunicaciones en la asignatura Antenas, puesto que por medio del diseño del material, se incentiva a la investigación, análisis, evaluación y diseños de estos equipos en el campo, y a pesar de que se cuenta con pocos equipos el estudiante pueda desempeñar sus funciones principales dentro de su entorno, todo esto se realiza bajo el diseño de investigación de proyecto factible la guía cuenta con tres prácticas enmarcadas en potencial el análisis de los sistema de comunicacional por medio de los software, además la ultima de ella está estipulada para la elaboración y evaluación de este equipo.

**Palabras clave:** Guía Práctica, recursos, unidad curricular antena

**ABSTRACT** — The research work titled **Proposal of a Practical Guide to the Antennas with Resources Available in the Laboratory of the Unefa Coro**, seeks to make a didactic material of a practical nature, to the students of telecommunications engineering in the subject antennas, since by Medium of the design of the material, research, analysis, evaluation and design of these equipment in the field are encouraged, and despite having few equipment the student can perform his main functions within his environment, all this is done under The feasible design research project the guide has three potential practices framed in the analysis of the communication system through the software, in addition the last of it is stipulated for the development and evaluation of this equipment.

*antenna*

### XI. INTRODUCCIÓN

Las universidades representan un organismo encargado de la enseñanza universitaria donde las personas puedan formarse con un carácter científico, tecnológico, moral, ético, humanista, profesional e integral ante el Estado, para brindarle apoyo en las diferentes áreas productivas laborales que se necesiten dentro de la sociedad, por ellos se debería brindar las principales herramientas que faciliten el desarrollo cognitivo en las diferentes áreas del conocimiento de allí la vitalidad de los recursos que se tenga en la mano para la aplicabilidad.

No obstante, para poner en práctica los contenidos abordados en algunas de las asignaturas en las carreras técnicas/científicas es necesario un laboratorio, definido por la UCAB (2006) como un lugar dotado de los medios necesarios para realizar investigaciones, experimentos, prácticas y trabajos de carácter científico, tecnológico o técnico, los cuales permiten darle la aplicación a los contenidos teóricos.

Por lo tanto, es indispensable que en las unidades curriculares requieran estos espacios para que se lleve a cabo una preparación. Por esta razón, la carrera Ingeniería en Telecomunicaciones ocasionalmente tiene estos espacios en el área de informática, física, electrónica o electrofísica, donde en ella se puede aprovechar para múltiples unidades curriculares que no necesariamente tenga relación con el nombre, tales como: programación, redes, comunicaciones I, comunicaciones II, líneas de trasmisión, microondas, antenas, redes de las telecomunicaciones entre otros, entonces para ello los docentes

deben adecuar los recursos a las necesidades que requiera en la materia.

De allí que, en la unidad curricular antenas, es una asignatura que está ubicada dentro del laboratorio de electrónica o electrofísica, puesto que representa el lugar más idóneo donde debería encontrarse dentro de la misma una gama de equipos, aunque particularmente para la asignatura antenas el Dr. Rafael Belloso (2015) señala que en estos laboratorios debería encontrarse con los siguientes equipos tales como osciloscopios, fuentes AC, fuentes DC, generador de señales sinusoidales, Crimpeadoras, tester, caudín, estaño, voltímetros, amperímetros, generador de frecuencia, analizador de espectro, generadores de RF, computadoras, conectores, tuerca, tornillo, tubos, donde se puedan simular, construir, evaluar, implementar, analizar, realizar mantenimientos de los diferentes tipos de antenas, permitiendo a los estudiantes tener una formación integral, técnica y científica para la defensa en el campo laboral.

En consonancia con lo anterior, la guía práctica busca darle respuesta a lo que establece el programa detallado de la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional Bolivariana en la asignatura Antenas (vigencia desde 2009), donde se menciona dentro de su componente práctico establecer el estudio de experimental de antenas verticales/dipolos, variaciones de la longitud efectiva e impedancia de entrada, estudio de las características, patrón radiación, polarización y hasta el estudio, cálculo e implementación de las antenas, mientras que en la teoría se debe estudiar el comportamiento, componentes, polarizaciones, medios y arreglos de las antenas, donde en ocasiones no se logran cumplir con los requerimientos mínimos que debe tener la asignatura en su componente práctico.

Por el contrario, cuando se incumple en el desarrollo de las prácticas esto pudiese causarles a los estudiantes un desmejoramiento en su crecimiento esencial para el desarrollo de las destrezas y habilidades necesarias para su desempeño profesional. A su vez la misma pudiera originar en los estudiantes una desmotivación, desconocimiento por la desvinculación entre los componentes teórico prácticos de la materia y desenvolvimiento inadecuado en las prácticas profesionales, por no contar con las herramientas adecuadas en su posible ámbito laboral, por la falta de aplicabilidad de los contenidos.

Es importante destacar que lo expuesto anteriormente, en ocasiones pudiese ser originado porque las casas de estudio a veces no cuentan con todos los recursos apropiados donde evalúen el desempeño de las prácticas en su totalidad. La UNEFA sede Coro, no escapa de esta realidad porque el aula cuenta con pocos materiales, equipos, accesorios indispensables para el desarrollo de las prácticas, entre ellos tenemos: Osciloscopio, computadoras, tomacorrientes, fuentes AC y DC,

multímetros. Para el cumplimiento adecuado de las prácticas es necesario evaluar bondades, fortaleza con lo que cuenta el entorno en cuantos a sus estudiantes, docentes, instituciones de apoyo, para el mejor aprovechamiento en la práctica de la materia.

Por lo anteriormente señalado, se propone la elaboración de una guía práctica de la asignatura antenas con recursos humanos, económicos e institucionales con lo que cuenta el laboratorio de la UNEFA Coro en el laboratorio de electrofísica, para aprovechar los recursos con los que cuenta actualmente la institución desarrollando de manera eficiente y eficaz las prácticas.

Por consiguiente al tener la guía, permitirá una congruencia entre los componentes teóricos prácticos de la asignatura, ajustándose con los recursos existentes en la universidad, buscando que el estudiante pueda concatenar los conocimientos adquiridos en la teoría y aplicarlos a la realidad social que se está viviendo y en su futuro más inmediato relacionarlo con su ámbito laboral en mantenimientos de los diferentes tipos de antenas, fabricación, análisis para evaluar las características intrínseca y extrínseca que la afecta y en la implementación de los arreglos, polarizaciones acordes con los espacios geográficos y factores climatológicos que afecte el comportamiento de la antena.

## XII. TÓPICOS DE INTERÉS PARA *INGENIO*

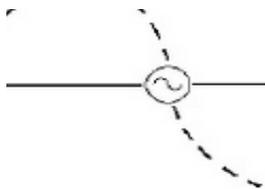
### A. *Introducción a las Antenas.*

Funcionamiento Básico de una Antena. Contenido de la Unidad I de la Unidad Curricular Antena, al definir el término antenas Tomasis W. (2013) señala:

“Una antena es un sistema que consta de un conductor metálico capaz de radiar y capturar ondas electromagnéticas. En otras palabras, es un dispositivo físico que sirve de interfaz entre las O.E guiadas por las líneas de transmisión y el espacio, o viceversa.”

Todas las antenas conocidas funcionan de manera similar, al conectar una fuente de corriente alterna en los terminales de la antena, aparece una distribución de tensión y corriente a lo largo de ella, las cuales verán de acuerdo a las dimensiones y tipos de antenas.

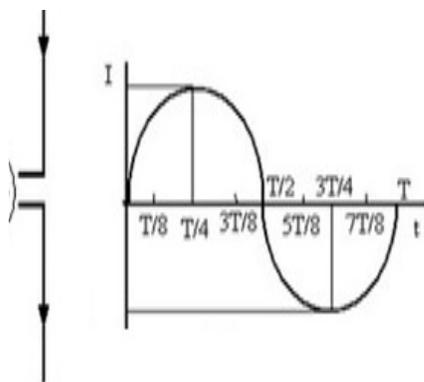
Considere la siguiente figura:



**Figura 1.** La distribución de corriente y tensión en una antena

dipolo de media onda [22]

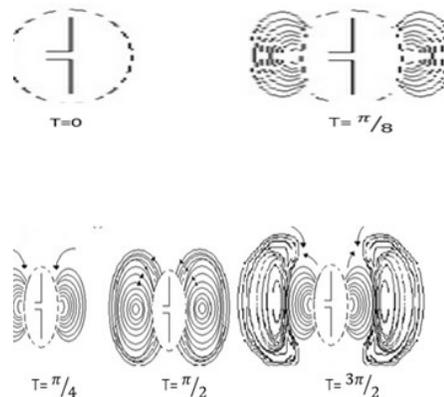
Por lo cual, se aprecia que en sus extremos se encuentran los puntos de máxima tensión y mínima corriente. Esta diferencia de potencial entre los conductores de las antenas crea un campo eléctrico  $\vec{E}$ , lo cual es ortogonal al campo  $\vec{H}$ , que circula por estos campos los cuales alcanzan valores máximos y mínimos dependiendo de la magnitud de la corriente respectiva. Para explicarse mejor el funcionamiento de una antena véase la siguiente figura:



**Figura 2.** Antena Dipolo y Distribución de la corriente a lo largo de un periodo

Supóngase primeramente que en el instante de tiempo  $T=0$  la corriente en la antena será cero y por ende no se crea un campo eléctrico, después de esto se comienza a aumentar la corriente hasta alcanzar su valor máximo  $\left(\frac{\pi}{4}\right)$ , por ende las líneas de campo eléctrico crecen, se cierran y se alejan de la antena hasta completar un paquete de líneas que se desprenden de la antena y

quedan libre en el instante  $T = \frac{\pi}{2}$ , durante el semiciclo se forma un nuevo paquete de líneas de campo eléctrico igual al ya formado pero en sentido contrario, las cuales empujan las líneas que se habían desprendido de la antena y hacen que estos se desplacen en una determinada dirección. Este proceso se repite una y otra vez dando lugar a la formación y propagación de las ondas electromagnéticas, puesto que el campo electromagnético generado por la corriente que circula por la antena se comporta igual al campo eléctrico.



**Figura 3.** Funcionamiento de la antena por cada instante del periodo

Principio de Reciprocidad de las antenas

Un aspecto fundamental de las antenas es el principio de reciprocidad, que establece que el comportamiento de la antena en transmisión es idéntico al comportamiento de la antena en recepción. Esto permite enfocar nuestras ideas hacia la transmisión o recepción, según sea más fácil, y luego extender el concepto hacia el comportamiento recíproco.

Así, una antena que transmita máxima señal en una dirección dada, también recibirá máxima señal en esa dirección.

Según este principio, toda antena conserva sus propiedades de radiación sea que esté funcionando como antena receptora o como transmisora.

**B. Práctica #1 de Antenas. Introducción a las antenas**

**Objetivos**

- Familiarizar a los estudiantes con los elementos y componentes de las antenas.
- Preparar los conectores para unirlos con cables coaxiales y antenas que se encuentran en la intemperie.

- Aplicar las cintas aislantes y vulcanizantes en las conexiones que se encuentran en la intemperie.

### Marco teórico:

Antena Sectorial. Especificaciones técnicas de la antena sectorial. Interferencia. Oxidación. Revestimiento: Núcleo. Torque. Unión o conexión. Mástil. Peinado de cables.

### Principales elementos que tienen los sistemas de antenas:

Antena.

Conectores.

Cable jumpe.

Duplexores.

Cable coaxial.

Kit de tierra.

Amplificador de mástil (mastamplifier): Compensa las pérdidas por cable y reduce la interferencia inter-cell e intra -cell

Bias t.

Cintas Aislantes.

Cintas Vulcanizantes.

### Equipos, Materiales y herramientas

Antena para internet inalámbrico 2.4Mhz

Antena sectorial

Destornillador: estría y pala

Cable coaxial (medida a convenir)

Conectores (medida a convenir)

Alicate de punta

Llave ajustable

Exacto o navaja

Llave boca abierta (medida a convenir)

Brocha

Lima

### Procedimientos:

-Desamar y amar las antenas sectoriales e inalámbricas con el fin de determinar la estructuración interna de la misma.

-Sujetar fijamente el cable coaxial con las manos.

-Realizar un corte de la capa exterior aproximadamente a 6mm de la punta del cable coaxial, girando el exacto en sentido de las manecillas del reloj, ejerciendo una leve presión para producir los cortes requeridos.

-Retirar con el cuchillo y el alicate de punta la cubierta exterior dejando a la vista un tramo de foam y del conductor exterior.

-Se retira el tramo de foam (espuma protectora).

-Para luego retirar los residuos del conductor central.

-Colocar la hembra del conector en el cable coaxial, dejando 3mm de la punta, luego apretar la parte trasera del conector en sentido horario utilizando para ello la llave boca abierta y la llave ajustable.

-Con la lima se suaviza los bordes del conductor central y se limpia con una brocha para no dejar residuos.

-Instalar la parte delantera del conector macho, roscándolo en la hembra del roscándolo y apretándolo con la llave ajustable y la llave boca abierta, evitando que el cuerpo se mueva

-Unir el cable coaxial con el conector de la antena.

-Por último recubrir las uniones o conexiones que se encuentran expuestas a la intemperie. Utilizando tanto cinta aislante como cinta vulcanizante, las cuales deben aplicarse por capas de la siguiente forma:

1) Aplicar una capa de cinta aislante sobre la conexión

2) Aplicar dos capas de cinta vulcanizante sobre la conexión

3) Aplicar tres capas de cinta aislante.

Recuerde que las cintas no deben exceder 70mm hacia los lados; este recubrimiento se hace con la finalidad de proteger las conexiones de los factores climáticos a la que están expuestos, evitando fallas en la transmisión.

### Actividad

- 1) Defina antena sectorial e inalámbrica
- 2) Nombre los componentes de la antena sectorial e inalámbrica.
- 3) Especifique las características establecidas por el fabricante de la antena sectorial.
- 4) Mencione la aplicación de la antena sectorial e inalámbrica.
- 5) ¿Explique la función que cumple cada elemento en un sistema de antena?
- 6) ¿Por qué cree usted que no se debe dejar residuos en el conector?
- 7) ¿Explique por qué se deben recubrir las conexiones que se encuentran a la intemperie?

### C. Radiación

Unidad II de la unidad curricular antenas, referida a los parámetros de radiación de una antena.

Según Monachesi, E. &Frenzel, A. (2011) los parámetros para una Antena son parámetros susceptibles de ser medidos. Permiten, desde el punto de vista de sistemas, tratar la antena como un dipolo. Se definen parámetros de tipo circuital y de tipo direccional. La mayoría de estos parámetros se definen en transmisión, pero son válidos también en recepción. Los principales parámetros de las antenas son:

- Directividad y Ganancia
- Diagrama de radiación o patrón de radiación
- Ancho del haz

- Impedancia de entrada
- Eficiencia de la antena
- Polarización
- Campos de Inducción de Radiación
- Longitud eléctrica y longitud física
  - Ancho de Banda
- Intensidad de Campo

#### a) Directividad y Ganancia

La directividad es la propiedad que tiene una antena de transmitir o recibir la energía irradiada en una dirección particular. Para un enlace inalámbrico que utiliza antenas fijas en ambos extremos, se puede utilizar esta directividad para concentrar la radiación en la dirección deseada. En cambio, para una estación móvil y otra fija o ambas móviles, donde no se puede predecir donde va a estar una de ellas, la antena deberá radiar en todas las direcciones del plano horizontal y para ello se utiliza una antena omnidireccional. La ganancia es una relación o cociente entre dos magnitudes físicas iguales (energías, potencias, tensiones, etc.), es decir un número adimensional que puede ser mayor, menor o igual a la unidad. La ganancia de una antena se expresa tomando como referencia la energía radiada de una antena estándar. Las dos referencias más comunes son la antena isotrópica y la antena dipolo resonante de media longitud de onda.

$$D = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad D = \text{Directividad} \quad (1)$$

$$\rho = \text{Densidad de potencia en un punto determinado de una antena} \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

$$\rho_{ref} = \text{Densidad de potencia en un punto con la antena de referencia} \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

La ganancia de una antena en una dirección dada es la cantidad de energía radiada en esa dirección comparada con la energía que podría radiar una antena isotrópica en la misma dirección, alimentada con la misma energía de una fuente. Lo que interesa generalmente es la ganancia máxima en la dirección hacia la cual la antena está radiando la mayor potencia. Si una antena real tiene una ganancia de potencia de 3 dB en una determinada dirección comparada con una antena isotrópica debe expresarse como 3 dBi.

El dipolo resonante de media longitud de onda también es un estándar útil para compararlo con otras antenas reales para una frecuencia dada o sobre una banda estrecha de frecuencias. Si la ganancia de potencia de una antena es de 3 dB en una determinada dirección comparada con el dipolo resonante de media onda debe ser expresada como 3 dBd.

Ganancia Directiva y Ganancia de Potencia Ambos términos se refieren a la capacidad de una antena para concentrar la energía en cierta dirección. Si se suministra la misma potencia a una antena cualquiera y también a una antena isotrópica, la Ganancia Directiva D (o directividad) de la primera antena, se obtiene mediante la relación:

D = Densidad de Potencia en la dirección de máxima radiación (lóbulo principal) Densidad de Potencia que existiría con la antena isotrópica

La Ganancia de Potencia G, se define como la relación entre la potencia radiada que debe emitir un radiador isotrópico para obtener una intensidad de campo en cierto punto, y la potencia eléctrica que se debe suministrar a la antena directiva, para obtener la misma intensidad de campo.

$$A_p = D * \eta \quad (2)$$

$$A_p = \text{Ganancia de potencia}$$

$$\eta = \text{eficiencia de la antena} ( )$$

Las dos definiciones anteriores aparentan ser iguales, pero la diferencia es que la Ganancia de Potencia considera las pérdidas óhmicas, es decir: En algunos textos se dice que estas dos ganancias son prácticamente iguales en antenas de VHF y UHF, pero se debe tener cuidado de no manejarlas en forma indistinta.

#### b) Diagramas de radiación o patrón de radiación

Es la representación gráfica de la forma en que la energía electromagnética se distribuye en el espacio. El diagrama puede obtenerse por la colocación de una antena fija de prueba con relación al entorno donde se está midiendo el diagrama, también por la rotación de la antena en torno a sus ejes, donde las señales enviadas son recibidas en un receptor capaz de discriminar con precisión la frecuencia y la potencia recibidas. Se puede representar esta medición en forma cartesiana o polar. La representación polar se hace mediante el trazado de segmentos proporcionales a una magnitud de referencia (módulo) y un ángulo que nos da la dirección, con respecto a una semirecta de referencia (argumento). Los resultados obtenidos son generalmente normalizados. El valor máximo de la señal recibida para 0 dB de referencia, facilita la interpretación de los lóbulos secundarios, con relación al frente de los bordes.

#### c) Ancho del haz

El ancho del haz de una antena se entiende como ancho del haz a mitad de potencia. Se encuentra en el pico de intensidad de radiación, luego se localizan los puntos de ambos lados del pico que representan la mitad de la potencia de intensidad del pico. La distancia angular entre los puntos de mitad de potencia se define como el ancho del haz. La mitad de la potencia expresada

en decibelios es de -3dB. Por lo tanto, algunas veces el ancho del haz a mitad de potencia es referido como el ancho del haz a 3dB. Generalmente, se consideran tanto el ancho de haz vertical como horizontal. Suponiendo que la mayoría de la potencia radiada no se disperse en lóbulos laterales, entonces la ganancia directiva es inversamente proporcional al ancho del haz: cuando este decrece, la ganancia directiva se incrementa.

**Lóbulos laterales:** Ninguna antena es capaz de radiar toda la energía en una dirección preferida. Inevitablemente una parte de ella es radiada en otras direcciones. Esos picos más pequeños son denominados lóbulos laterales, especificados comúnmente en dB por debajo del lóbulo principal.

**Nulos:** En los diagramas de radiación de una antena, una zona nula es aquella en la cual la potencia efectivamente radiada está en un mínimo. Un nulo a menudo tiene un ángulo de directividad estrecho en comparación al haz principal. Los nulos son útiles para varios propósitos, tales como la supresión de señales interferentes en una dirección dada.

#### d) Impedancia de entrada

Es el cociente entre el voltaje aplicado a los terminales de entrada de la antena y la corriente resultante. En general tiene una componente resistiva y una reactiva. Sin embargo, si el punto de alimentación de la antena está en un máximo de corriente, la componente reactiva resulta despreciable, por tanto la impedancia de entrada es igual a la suma de la resistencia de radiación más la resistencia de pérdida. Si la impedancia no presenta una parte reactiva (puramente resistiva) a una frecuencia determinada se dice que es una antena resonante.

**Resistencia de radiación:** Es un valor asignado a una resistencia ficticia, cuyo valor es el que tendría una resistencia que disipara la misma potencia eléctrica entregada por la antena con la misma potencia radiada por la antena. En la práctica no toda la potencia entregada por la antena es radiada totalmente al espacio que la rodea. Una parte se disipa bajo la forma de calor a causa de las pérdidas resistivas provocada por los conductores, aisladores de soporte, la torre y los cables de anclaje.

Las pérdidas óhmicas están determinadas por la frecuencia de trabajo. En bajas frecuencias, estas pérdidas son pequeñas comparadas con la resistencia de radiación y la antena es un radiador muy eficiente. En altas frecuencias, donde la antena es relativamente corta con relación a su longitud, el suelo es un componente esencial que forma parte del sistema irradiante. La altura de la antena respecto al suelo conductor es un factor importante que afecta la resistencia de radiación. Algunas ondas son reflejadas por el suelo, y al regresar a la antena, inducen corriente cuya magnitud y fase dependen de la distancia entre la antena y el suelo. Si llegan en fase habrá más radiación y sucede lo contrario si llegan en oposición de fase.

#### e) Eficiencia de la antena

Es la relación entre la potencia radiada por la antena y la potencia total entregada a la antena para una frecuencia dada de operación. Se puede considerar que la resistencia total de carga está formada por dos resistencias en serie, una de valor de R (resistencia de radiación) y otra de valor r que representa la disipación óhmica de la antena. Será tanto más eficiente cuanto mayor sea la relación R/r. En consecuencia, se puede expresar la eficiencia de la antena en valores porcentuales como:

$$\eta = \frac{Prad}{Prad + pd} * 100 \quad (3)$$

$$\eta = \frac{Prad}{Pent} * 100 \quad (4)$$

$$\eta = \frac{Rr}{Rr + \mathfrak{R}} \quad (5)$$

Donde:

$$\eta = \text{eficiencia de la antena}(\%)$$

$$Prad = \text{Potencia de Radiación}(w)$$

$$Pd = \text{Potencia Disipada}(w)$$

$$Pent = \text{Potencia de Entrada}(w)$$

$$R_r = \text{Resistencia de Radiación}(\Omega)$$

$$R_e = \text{Resistencia de Efectiva}(\Omega)$$

#### f) Polarización

Se define como la orientación del campo eléctrico de una onda electromagnética. En general, se describe por una elipse. Hay dos casos especiales de la polarización elíptica: la lineal y la circular.

Con la lineal, el vector del campo eléctrico se mantiene en el mismo

plano del eje de la antena todo el tiempo. El campo eléctrico posiciona a la antena en una orientación vertical, horizontal o en algún ángulo intermedio entre los dos.

La radiación en una antena polarizada verticalmente se ve menos afectada por las reflexiones en el camino de transmisión. Las antenas omnidireccionales siempre tienen una polarización vertical.

Con la antena en polarización horizontal, tales reflexiones causan variaciones en la intensidad de la señal recibida. Las antenas horizontales tienen menos probabilidad de captar interferencias generadas por el hombre que las polarizadas verticalmente. En la polarización circular el vector del campo eléctrico aparece rotando con un movimiento circular en la dirección de la propagación, haciendo una vuelta completa para

cada ciclo de RF. Esta rotación puede ser hacia la derecha o hacia la izquierda. La elección de la polarización es una de las elecciones de diseño disponibles para el sistema irradiante de RF.

g) Campos de inducción y campos de radiación

De la energía de los campos electromagnéticos que se generan alrededor de la antena, una zona cercana a la misma forma parte de los campos de inducción donde la intensidad es una función inversa del cuadrado de la distancia. El dispositivo se comporta como un circuito resonante donde hay intercambio de energía entre el campo eléctrico y el magnético y no hay radiación. Uno de los campos es máximo cuando el otro pasa por cero y a su vez se encuentran desfasados 90° en el tiempo.

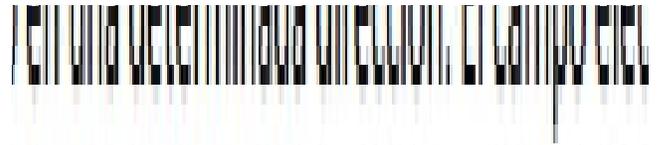
Otra zona situada a unas pocas longitudes de onda de la antena la constituyen los campos de radiación donde se manifiesta la energía de radiación de la antena. La intensidad de los campos radiados es una función inversa de la distancia. Estos campos obedecen al hecho de que se requiere un cierto tiempo para que los campos se transfieran de un medio físico (antena) al espacio libre. Parte del campo original + - Generador de RF Línea de Transmisión Dipolo de 1/2 onda Plano del campo eléctrico E Dirección de propagación E Plano del campo magnético H 11 permanece en la antena y la otra parte se propaga como una onda electromagnética por el espacio libre.

**D. Polarizaciones**

Juan Córcoles Ortega (2014) menciona en su trabajo de investigación que las polarizaciones que representan el campo radiado por una antena, es la figura geométrica que traza el campo eléctrico al variar el tiempo en una determinada dirección. El campo eléctrico en el dominio de tiempo y del espacio se expresa como:

(6)

El campo también se expresa como contribución de dos componentes ortogonales entre sí: componente copolar (CP) y contrapolar (XP), también se les llaman la componente deseada y la indeseada.



(7)

La variación de dirección del campo y su sentido de giro traza una figura visto por un observador desde la antena, así es definido el tipo de polarización. Existen varios tipos:

**Polarización lineal:** El campo proyectado sobre el plano de observador es una recta

**Polarización circular:** El extremo del campo proyectado sobre el plano del observador se mueve sobre una circunferencia.

**Polarización elíptica:** El extremo del campo proyectado sobre el plano del observador se mueve sobre una elipse.

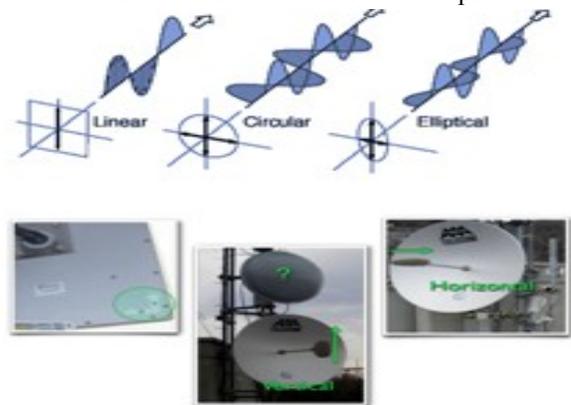


Figura 4. Polarizaciones de una Antena

La polarización de una antena puede ser deducida a menudo por la orientación del alimentador o iluminador. Cuando este está cubierto por un arándome esto suele ser imposible. Normalmente las antenas tienen marcas que identifican la polarización, pero a veces es necesario consultar la hoja de datos del fabricante. La mayoría de las antenas omnidireccionales tienen polarización vertical. Si se escoge polarización horizontal, se puede evitar una buena parte de la interferencia (puesto que la mayoría sería de polarización vertical).

**E. Práctica #3 de Antenas. Diseño de una Antena.**

**Objetivo:** Estudiar, Calcular e implementar los parámetros para la elaboración de una antena.

**Antena Omnidireccionales**

Estas son antenas capaces de emitir señal en todas las direcciones, la ganancia de la antena dependerá de la altura que posea el cable coaxial por cada 6cm de cable es 2 dBi de ganancia, es decir mientras más larga más ganancia tendrá.

**Pasos para realizar la Antena Omnidireccional**

**Materiales Utilizados:**

1 Metro de Cable RG-8U de 2mm, 50Ω  
 1 metro de cable RG-58U de 16mm, 50Ω  
 1 conector PL259 con su Reductor  
 1 conector PL259 hembra (chasis)  
 1 metro de estaño 40/60 (plomo/estaño)  
 1 conector SMA hembra  
 2 abrazaderas de 2 pulgadas  
 2 tornillos de ½  
 2 tuercas de ½  
 Tubo de PVC 33mm de diámetro, y 2 pulgadas  
 2 tapones para tubos PVC de 2 pulgadas  
 1 base de silla ejecutiva (30cm de alto)  
 1 base de MDF para soporte del router o módems  
 1 mástil de fibra de vidrio de 2 pulgadas de diámetro por 1.43 de alto

**Herramientas:**

Alicate  
 Pinza punta fina  
 Navaja  
 Cautín de 60watts  
 Segueta  
 Destornilladores  
 Metros  
 Crimpadora (ponchadora) para cable RJ-58U  
 Tester

**Metodología para diseñar la antena omnidireccional****Procedimientos para la realización de la antena:**

- 1) Medir el cable coaxial hasta llegar a 6cm de largo.
- 2) Cortar y pelar cada extremo del cable, dejando 1cm de cada lado.  
(Suponiendo que quedaran 4cm en el protegido)
- 3) Quitar parte de la chaqueta protectora para luego soldar la malla de tierra.
- 4) Soldar cada extremo positivo y negativo consecutivamente de forma apilada, tantas veces como dBi se requiera, en nuestro caso, está compuesto por 15 tramos seguidos. De tal manera, que la ganancia es de 15dBi.
- 5) Adaptar el conector PL-259 hembra “chasis” al tapón del tubo PVC
- 6) Soldar en uno de los extremos el conector PL-259 hembra “chasis” que este será la conexión de la antena al router.
- 7) Por consiguiente, se introduce la antena en el tubo PVC de 2 pulgadas.
- 8) Se coloca el otro tapón en la parte superior de la antena.

**Procedimientos para la realización del cable adaptador:**

- 1) Cortar el cable RG-59u aproximadamente a 1 metro de largo.
- 2) Colocar a un extremo el conector PL-259 macho con su reductor.
- 3) Colocar al otro extremo del cable el conector SMA hembra.

4) Con el tester en la posición de ohmiaje se mide la continuidad del cable y de los conectores, siendo las mediciones satisfactorias.

**Pasos para realizar la Antena Casera Wi-Fi Elaborada con CD'S**

Para la elaboración de esta antena se necesitaron los siguientes materiales:

- 2 cd's.
- Papel aluminio.
- Cinta transparente/aislante.
- Pegante.
- Alambre de cobre (sin cobertura) 1 mt.
- Cable coaxial RG 58 2 mts.
- Conector RP-SMA macho.

**Herramientas utilizadas:**

- Regla.
- Alicates.
- Pinzas.
- Marcador.
- Cortafrío.
- Cautil.
- Pistola con silicona.

**Proceso para hacer la antena:**

- 1- Se forma con el alambre de cobre una figura como en especie de dos rombos, con las siguientes medidas: 8 segmentos de 32 milímetros cada uno, se deja una tolerancia de por lo menos de 30 milímetros, para esto utilizaremos unas herramientas como son los alicates y unas pinzas para doblar el alambre, observaremos este primer proceso como se mostrará en las imágenes.
- 2- Con el papel aluminio se hace un círculo a la medida de los cd's y se unen los dos cd's quedando en el medio el papel aluminio, como se muestra en las siguientes imágenes:
- 3- Procedemos aquí a crimpar el cable RG-58 con la terminal RP-SMA, como lo mostrará la imagen.
- 4- Tomas el cable y se corta a 2 cms y se abre:
- 5- Se empieza el proceso de crimpado, el cable y el conector se unen.
- 6- Luego se termina de fijar el cable con el conector, ya sea con una abrazadera o un amarre plástico.
- 7- Toma la lámina y le abrimos unos agujeros que van a quedar de la siguiente manera:
- 8- Se mide la lámina con el centro de los cd's de forma que los dos agujeros de la lámina coincidan con el agujero central de los cd's y se centra de la forma más posible.
- 9- De acuerdo al paso anterior a los cd's se le abren los agujeros para asegurar la lámina con ellos.
- 10- Se fija la lámina a los cd's con tornillos y se arma la antena con la mariposa y el cable RG-58 con el conector minicoaxial,

estos los puede fijar con puntos de soldadura de estaño o con silicona pero lo recomendable es que la mariposa quede con unos puntos de soldadura y el cable con silicona, puesto que la soldadura lo puede dañar.

11- Probar la antena en un computador con tarjeta inalámbrica o un router luego con el programa Network Stumbler, este lo debes descargar, dependiendo el sistema operativo que tengas pero el mejor es windows7, este programa mide la frecuencia de la señal y te da las señales que capta.

**Actividad.**

- 1) ¿Según el modelo de la antena realizada cual sería la ganancia del equipo?
- 2) ¿A partir del voltaje y corriente del modem, calcula la potencia de entrada?
- 3) Calcule la potencia de salida

$$AP_{dB} = 10 \log \left( \frac{p_{out}}{p_{ent}} \right) \quad (10)$$

- 4) ¿Cuál es el valor de la impedancia de entrada de la antena? \_\_\_\_\_.
- 5) ¿Mide hasta el alcance que tiene la señal?
- 6) ¿A partir del alcance, calcula la densidad de potencia?

$$\rho = \frac{p_{ent} * A_p}{4 \pi * r^2} \quad (11)$$

- 7) ¿Calcula la directividad y eficiencia de la antena?

$PIEI = A_p * P_{ent} \quad (12)$	$A_p = D * \eta \quad (2)$
$PIEI = D * P_{rad} \quad (13)$	

- 8) ¿Cómo se daría el diagrama de radiación de la antena realizada?
- 9) ¿Qué información nos origina el diagrama de radiación de las antenas?

- 10) ¿En función de los datos obtenidos, qué puedes concluir en función de la antena realizada?

---



---



---



---



---

**XIII. CONCLUSIONES**

Para darle respuesta al objetivo que menciona:  
Diagnosticar los recursos necesarios para las prácticas del laboratorio de la asignatura antenas.

Era necesario realizar un instrumento en el laboratorio de

<b>Voltaje</b> $V = P/I$	<b>Corriente</b> $I = P/V$	<b>Potencia</b> $P = V.I \quad (9)$
-----------------------------	-------------------------------	--

electrofísica de la UNEFA sede Coro, en el aula A6, para conocer los implementos con los que cuenta el aula y de allí determinar las cantidades de prácticas que se planifican en función de los recursos que se tiene.

Entre los equipos dentro del laboratorio se consideran para la asignatura antena que hay: tres osciloscopios funcionales, seis fuentes de voltaje sin cable, un generador de señales sinodales, un multímetro, tres fuentes regulables sin cable, una antena sectorial y una inalámbrica, el cual con los materiales que pueden solicitar para las prácticas a los estudiantes, se realizan entre tres y cuatro prácticas, donde haya un mínimo de 12 y máximo 15 estudiantes por prácticas que utilicen los equipos, materiales y simuladores para determinar los parámetros de las antenas.

No obstante, para determinar el orden que tendría la asignatura antena se verificó el sinóptico de la misma, otorgada por la UNEFA en 2009. Adicionalmente, se fue hasta la sede principal de UNEFA Chuao en Caracas, para determinar si existía para la asignatura antena un manual de prácticas que especificara el orden que establece el programa, en virtud de adaptarlo a lo que cuenta la UNEFA CORO. Tras ese hallazgo, se concluyó que no existe, ni manual ni libro actualmente que especifiquen como se determinen las prácticas. Por ello, fue necesario realizar un estudio entre lo que establece la teoría y práctica de la materia para unir y concatenar los contenidos, en virtud de que el estudiante observe la relación entre ambos componentes de la materia.

En Relación al Diseño de la Guía

- Se desarrollaron tres prácticas que abarquen cuatro objetivos de la teoría y cinco de la práctica que establece el programa detallado de antenas.

- Dentro de la guía se busca que los estudiantes analicen, determinen y concluyan la importancia de los parámetros y la polarización de la antena en el contexto.
- Se simuló antes de implementar un sistema de antenas para conocer su Factibilidad.
- Se aprovecharon los recursos disponibles con los estudiantes, docentes y universidad.
- Se elaboraron los diversos tipos de antenas caseras.
- Se comprobó que los datos suministrados por la antena fabricada sean iguales a los calculados.

## II. AGRADECIMIENTOS

En cuanto a la estructura metodológica se le agradece el apoyo y ayuda de la profesora Elsa Reyes, mientras que en la parte técnica al Ing. Jesús Bracho.

## REFERENCIAS

- [1] Alemán, D. & Mata, M. (2006). Guía de elaboración de un manual de prácticas de laboratorio, taller o campo: Asignaturas teórico prácticas. [Documento en Línea]. Disponible en: <http://www.rivasdaniel.com/Pdfs/GUIAMANUALPRACTICAS.pdf>. [Consulta: 2015, Diciembre 3].
- [2] Belloso, R. (2015). Laboratorio de Física y Electrónica. . [Documento en Línea]. Disponible en: [https://www.urbe.edu/laboratorios/laboratorio\\_fisica\\_electronica.html](https://www.urbe.edu/laboratorios/laboratorio_fisica_electronica.html) [Consulta: 2015, Diciembre 3].
- [3] Corral, Y. (2008). Validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación para la recolección de Datos. [Documento en Línea]. Disponible en: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/educacion/revista/n33/art12.pdf> [Consulta: 2015, Diciembre 3].
- [4] Duran. N. (2002). Antena Dipolo. Disponible en: <http://es.slideshare.net/nhduran2002/resumendipolo> [Consulta: 2015, Noviembre 28].
- [5] Felipe, (2014). Real Academia Española. [Documento en Línea]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=ObWToYw> [Consulta: 2015, Diciembre 1].
- [6] Fidias, A. (2006). El proyecto de investigación. (5ta Edición) Caracas, Venezuela: Editorial Episteme, C.A.
- [7] Franco, Y. (2011). Tesis de Investigación. [Documento en Línea]. Disponible en: <http://tesisdeinvestig.blogspot.com/2011/05/tipos-de-investigacion.html>[Consulta: 2015, Diciembre 3].
- [8] Jiménez, W. (2013). Proyecto Factible. [Documento en Línea]. Disponible en: <http://blagshat.blogspot.com/2013/02/proyecto-factible-wilfredo-jimenez.html>. [Consulta: 2015, Diciembre 2].
- [9] Luna, C. (2013). Arreglo de Antena. [Documento en Línea]. Disponible en: [https://prezi.com/svhp\\_7mc4s4m/arreglos-de-antenas/](https://prezi.com/svhp_7mc4s4m/arreglos-de-antenas/) [Consulta: 2015, Noviembre 28].
- [10] Monachesi, E. & Frenzel, A. (2011). Conceptos Generales de las antenas. [Documento en Línea]. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan\\_frt/antenas.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/wlan_frt/antenas.pdf). [Consulta: 2015, Diciembre 2].
- [11] Ortega, E. (2011). Diseño y Elaboración de una Guía Práctica de Laboratorio basada en el equipo de medición de un espectro de radiación de antena Lab-Volt. [Documento en Línea]. Disponible en: [http://repository.upbbga.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/1219/1/digital\\_20833.pdf](http://repository.upbbga.edu.co:8080/jspui/bitstream/123456789/1219/1/digital_20833.pdf) [Consulta: 2015, Diciembre 2].
- [12] Pascual, A. (2007). Antenas y Cables. [Documento en Línea]. Disponible en: [http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless\\_es/files/08\\_es\\_antenas\\_y\\_cables\\_guia\\_v02.pdf](http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_es/files/08_es_antenas_y_cables_guia_v02.pdf) Consulta: 2015, Diciembre 6].
- [13] Ray, A. (2009). Antenas y Lineas de transmisión. [Documento en Línea]. Disponible en: <http://wndw.net/pdf/wndw-es/chapter4-es.pdf> [Consulta: 2015, Diciembre 6].
- [14] Tomasis, W. (2003). Sistema de Comunicaciones Electrónicas. Documento en Línea]. Disponible en: <https://hellsingge.files.wordpress.com/2014/08/sistemas-de-comunicaciones-electronicas-tomasi-4ta-edicion3b3n.pdf>. [Consulta: 2015, Diciembre 6].



# DISEÑO DE UN PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA EL ANÁLISIS AERODINÁMICO Y DE TRIMADO DE UN HELICÓPTERO DE CONFIGURACIÓN CONVENCIONAL

Carlos Horacio Alviarez Serrano

Departamento de Ingeniería Aeronáutica, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Bolivariana, Sede Maracay, Núcleo Aragua, Venezuela.

Carlosalviarez1995@gmail.com

**RESUMEN** —Empleando una metodología basada en un diseño de investigación numérica correlacional transversal, y fundamentado en una recopilación de datos documental, se estableció los criterios y teorías que serían implementados en el programa Umbrella. A través de antecedentes clave, fue la teoría del elemento de pala en combinación con la teoría de cantidad de movimiento el método para calcular la aerodinámica del rotor. Se desarrolló el modelo a implementar en el código, mediante hipótesis y propuestas realizadas por autores de trabajos previos. Se realizaron los algoritmos y las ecuaciones generales para definir las condiciones de estudio. Finalmente, fue necesario el cálculo del trimado de un helicóptero para comparar los resultados del programa con los de otros autores, verificando entonces su validez.

*Palabras clave:* Aerodinámica, Teoría del elemento de pala, Teoría de cantidad de movimiento, Helicóptero, Rotor.

**ABSTRACT**—Employing a methodology based on a numerical correlation transversal research design, and based on a documentary information recompilation, then proceeded to establish the criteria and theories that will be implemented in the program Umbrella. Through key antecedent, the blade element momentum theory was the method that will be used to calculate the aerodynamic loads on the rotor. Development the model to implement in the source code by means of hypothesis and proposes made by authors of previous works. Were performed the algorithms and the general equations to define the study's conditions. Finally, it was necessary to calculate the trim of a helicopter with the goal of compare the results of the program with the other's results, verifying their validity.

*Keywords:* Aerodynamics, Blade element momentum theory, Helicopter, Rotor.

## XIV. INTRODUCCIÓN

Según Bramwell [1], el método que comúnmente se emplea en la industria de los helicópteros durante su análisis preliminar es el de la teoría del elemento de pala (TEP) en combinación con la teoría de cantidad de movimiento (TCM). Estas tienen diferentes desarrollos para sus aplicaciones: movimiento axial del helicóptero,

movimiento horizontal. Cada una de ellas puede ser utilizada de manera independiente para realizar el análisis, como Cruz [2] quien empleó TEP para realizar el análisis de un helicóptero experimental.

La combinación de estos métodos para el análisis de un helicóptero UH-60, mediante un código escrito en lenguaje de programación, fue llevado a cabo por Sevinç Çalişkan [3] a través de la implementación en un código para realizar cálculos aerodinámicos que serían utilizados para estimar la condición de trimado de la aeronave, mediante el desarrollo analítico de la teoría, utilizando simplificaciones y aproximaciones. Por otro lado, el programa diseñado en el actual paper (cuyo nombre es Umbrella), se basa en el análisis diferencial de los parámetros sobre superficies discretizadas, que luego tendrán un procesamiento para hallar las fuerzas totales. Existen pocos antecedentes disponibles directamente relacionados con la creación de un código para el análisis de helicópteros.

## XV. DISEÑO DEL PROGRAMA

### A. Pre-procesamiento

El código computacional está dividido en varias funciones encargadas de procesos distintos. Cinco funciones se dedicarán a obtener y guardar la geometría del helicóptero en un archivo .mat, que luego será cargado para el análisis. El tiempo e intervalo de simulación, las condiciones atmosféricas, las velocidades de traslación y angular del rotor serán obtenidos por las últimas funciones. La geometría del helicóptero puede ser visualizada, detallando la posición del centro de gravedad (en caso de que sea especificada) como se muestra en la Fig. 1.

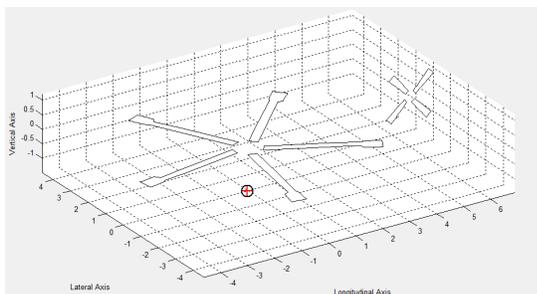


Figura 1– Visualización de geometría

Para el estudio aerodinámico, la geometría de las palas deberá ser discretizada (mallada) de la manera que el usuario haya definido, para la realización de este mallado, la estructura que contiene la geometría es enviada a una función que ejecutará todo el proceso. Posteriormente, se empleará el solver correspondiente a la condición de vuelo: Horizontal o axial.

La geometría de las palas se define en cualquier cantidad de secciones y a su vez estas secciones en varios paneles, los cuales no necesariamente deben distribuirse de manera uniforme o lineal a lo largo de la pala. La cuerda (c), torsión geométrica (tw) y aerodinámica (foil) de cada sección se establece de cualquier forma, es decir, no necesariamente debe ser uniforme o lineal. El mallado se realiza dividiendo las secciones en paneles (y), a los cuales se les asignarán valores de cuerda, envergadura (s), torsión geométrica y aerodinámica de manera lineal como se muestra en la Figura 2.

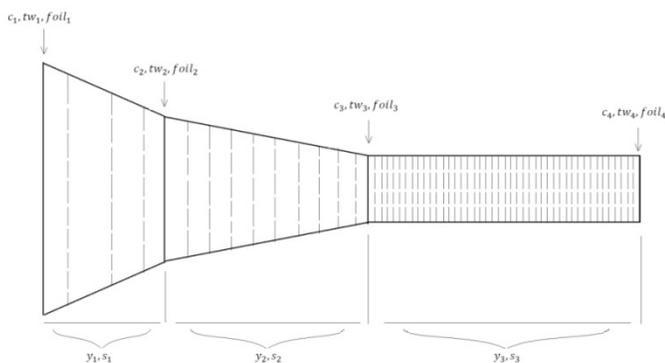


Figura 2 - Geometría aleatoria de una pala de tres secciones.

B. Procesamiento

Los solvers serán los encargados de solucionar las ecuaciones que definen las fuerzas aerodinámicas e inerciales consideradas en el sistema. El fundamento aerodinámico es la teoría del elemento de pala (TEP) en combinación con la teoría de cantidad de movimiento (TCM). Se definen dos

solvers, debido a que este método posee diversos enfoques que son dependientes de la condición de vuelo de la aeronave: vuelo horizontal o axial. La teoría de cantidad de movimiento fue formulada por Rankine & Froude [4], por su parte TEP fue propuesto por Froude y desarrollado por Taylor [4]. Para TCM se realizaron ciertas consideraciones:

- a) Es considerado flujo no viscoso.
- b) Incompresible.
- c) La presión estática y velocidad son uniformes sobre cada sección transversal en el volumen de control.

Por otro lado, para TEP es considerado flujo no viscoso e incompresible y además que cada elemento de pala sería estudiado como un perfil bidimensional, por lo que se despreciaría la pérdida de punta de pala por conexión intradós – extradós. Es por ello, que Prandtl [4] formula un factor de corrección de manera analítica, a fin de considerar por TEP una distribución más realista de la sustentación en una superficie sustentadora de tres dimensiones.

Para el vuelo axial el método se desarrolla empezando por la teoría de cantidad de movimiento, la cual estudia la tracción generada por el rotor en el volumen de control mostrado en la Fig. 3. A través de ella, se desenvuelve un sistema de ecuaciones hasta hallar la tracción y el torque generado por el rotor con factores de interferencia que representan la velocidad inducida en cada elemento de pala. Los factores de interferencia deben ser hallados a través de métodos iterativos, y en vista de que se evalúa la contribución de tracción de cada sección de pala, la distribución de la velocidad inducida sobre el rotor es no uniforme.

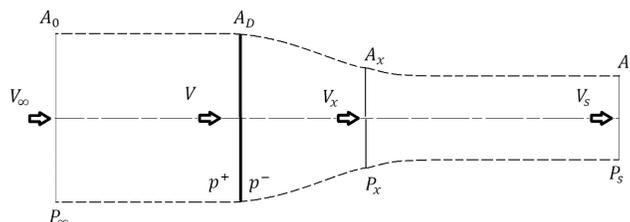


Figura 3 - Distribución de parámetros en el volumen de control.

A través de (1) y (2), extraídas de Durand [4], es posible calcular el factor de interferencia axial y radial de cada sección:

$$\frac{a}{1+a} = \frac{\sigma'(C_L \cos \phi - C_D \sin \phi) F}{4 \sin^2 \phi} \tag{1}$$

$$\frac{a'}{1-a'} = \frac{\sigma'(C_L \sin \phi + C_D \cos \phi) F}{4 \cos \phi \sin \phi} \tag{2}$$

Siendo a y a' los factores de interferencia axial y radial,  $\sigma'$  la solidez local,  $C_L$  y  $C_D$  el coeficiente de sustentación y arrastre,  $\phi$  el ángulo de paso efectivo y F el factor de

corrección de Prandtl. El método para el análisis en vuelo horizontal es menos sofisticado que el anterior, este se basa en asumir una distribución uniforme en el disco a través de TCM en el volumen de control mostrado en la Fig. 4. Sin embargo, es necesario aplicar una corrección (además de la de Prandtl) para obtener una distribución más realista de la velocidad inducida en el rotor, la cual es propuesta por Drees [5], quien la desarrolla a partir de la teoría de vórtices y experimentos:

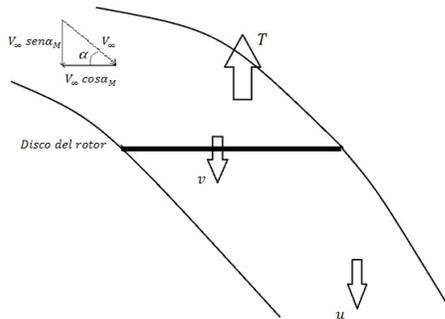


Figura 4 - Volumen de control en vuelo horizontal

La velocidad inducida  $v_0$  es representada por (3) en el sistema para el movimiento horizontal del helicóptero, considerada uniforme sobre todo el rotor, lo cual debe ser corregido con el empleo de (4), (5) y (6) a fin de obtener una distribución de velocidades inducidas  $v$  en cada segmento de la pala, las cuales dependen de los valores arrojados por (7) y (8), todas estas ecuaciones fueron obtenidas de Johnson [5]. Para resolver las ecuaciones será utilizado el método de Newton-Raphson:

$$v_0 = \frac{T}{2\rho A \sqrt{(V_\infty \cos \alpha_M)^2 + (V_\infty \sin \alpha_M + v_0)^2}} \quad (3)$$

$$v = v_0 \left( 1 + K_X \frac{r}{R} \cos \psi + K_Y \frac{r}{R} \sin \psi \right) \quad (4)$$

$$K_X = \frac{4}{3} \left[ (1 - 1.8\mu^2) \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2} - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right) \right] \quad (5)$$

$$K_Y = -2\mu \quad (6)$$

$$\mu = \frac{V_\infty \cos \alpha_M}{\omega R} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{V_\infty \sin \alpha_M}{\omega R} \quad (8)$$

Donde  $T$  es la tracción generada por el rotor,  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área del disco del rotor,  $V_\infty$  es la velocidad aerodinámica del helicóptero,  $\alpha_M$  es el ángulo de ataque del rotor principal,  $K_X$  y  $K_Y$  son los factores de corrección para la velocidad inducida en el rotor,  $r$  es la posición del panel en el radio del rotor,  $R$  es el radio total del rotor,  $\psi$  es la posición del panel en el acimut del rotor,  $\mu$  es la velocidad adimensional de avance,  $\lambda$  es la velocidad adimensional de flujo axial,  $\omega$  es la velocidad angular del rotor y  $R$  es el radio del rotor.

La teoría del elemento de pala, para ambos solvers, está encargada de calcular las fuerzas y coeficientes generados por cada sección y, por lo tanto, por el rotor. TEP tiene su fundamento en una distribución de fuerzas aerodinámicas como se muestra en la Fig. 5

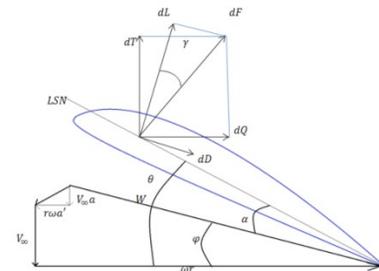


Figura 5 - Fuerzas aerodinámicas en TEP

La tracción de cada panel en la pala es representada por (9):

$$dT = \frac{1}{2} N \rho W^2 (C_L \cos \varphi - C_D \sin \varphi) c dr F \quad (9)$$

A su vez, el torque es representado por (10):

$$dQ = \frac{1}{2} N \rho W^2 (C_L \sin \varphi + C_D \cos \varphi) c r dr F \quad (10)$$

Donde  $dQ$  es el torque en el elemento de pala,  $dT$  es la tracción producida por el elemento de pala,  $N$  es el número de palas,  $W$  es la velocidad aerodinámica total en el elemento de pala,  $c$  es la cuerda del elemento de pala,  $r$  es la posición del elemento de pala en la envergadura de la misma y  $dr$  es el diferencial de envergadura para la sección de la pala. El solver1 será el encargado para la condición de vuelo axial y el solver2 para la condición de vuelo horizontal. En estos solvers también se integra una función que se encarga del cálculo del

ángulo de batimiento de las palas.

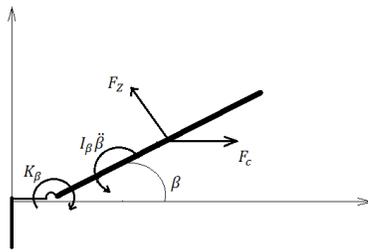


Figura 6 – Sistema del batimiento

La Fig. 6 muestra el sistema estudiado por la función para obtener el ángulo de batimiento, donde se busca establecer la velocidad y posición angular de las palas para cada estación de tiempo. Se puede destacar que  $\beta$  es el ángulo de batimiento,  $\beta_p$  es el ángulo de precono,  $K_\beta$  es la rigidez del muelle,  $I_\beta$  es el momento de inercia de la pala,  $F_z$  es la fuerza normal a la pala y  $F_C$  es la fuerza centrífuga. Es preciso visualizar a través de un diagrama de flujo el principio de funcionamiento de cada solver, empezando por el primero de ellos, tal como se muestra en la Fig. 7.

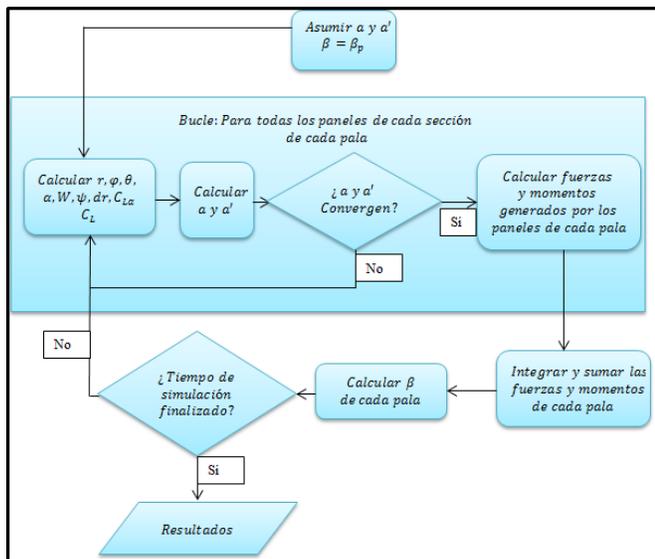


Figura 7 – Diagrama de flujo de solver1

El bucle mostrado en la Fig. 6 significa que el proceso que encierre se repetirá tantas veces como paneles, secciones y palas existan. El solver2, al tener un enfoque distinto del modelo, posee unas características disímiles en el proceso de cálculo, el método para obtener la velocidad inducida no es diferencial. Es por ello, que se aplican las correcciones y debe calcularse primero la fuerza de tracción del rotor. La Fig. 8 muestra el diagrama de flujo del solver2.

De igual manera, los bloques encerrados en el cuadro de bucle se repetirán tantas veces como paneles, secciones y palas existan en el sistema.

### C. Trimado

El estudio de trimado del helicóptero fue anexado considerando los componentes principales que se encuentran en el helicóptero de configuración convencional. Las consideraciones fueron las siguientes:

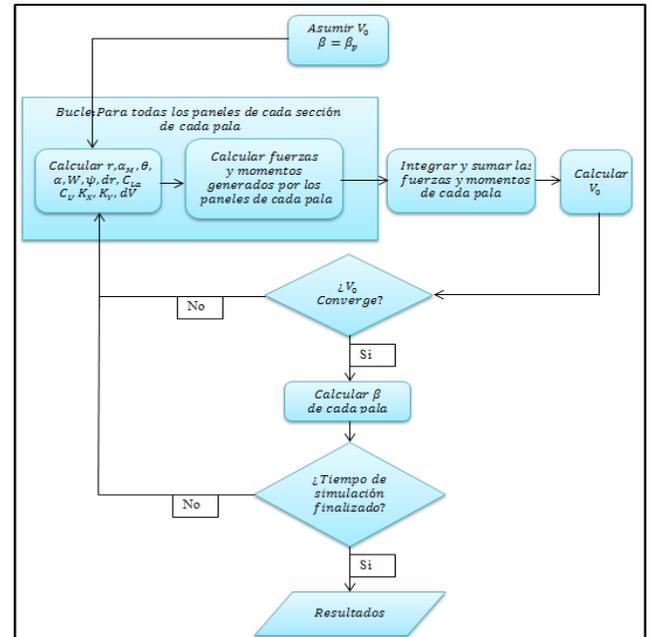


Figura 8 - Diagrama de flujo de solver2

- Será únicamente para vuelo horizontal.
- En los elementos de pala del rotor de cola, solo será considerada la velocidad inducida y la velocidad tangencial producto de la rotación de las mismas.
- Se considerará que el centro de presión del fuselaje coincide en ubicación con el centro de gravedad de la aeronave.
- El fuselaje solo generará sustentación, arrastre y momento de cabeceo.
- El flujo de aire en el estabilizador horizontal y vertical se considerarán no perturbados por la estela del rotor.
- Se despreciará cualquier deformación estructural en la aeronave.

Las ecuaciones utilizadas fueron determinadas, a partir de las fuerzas en el helicóptero, tomando como referencia el eje de rotación del rotor principal, tal como se muestra en las Fig. 9 y 10 [7]:

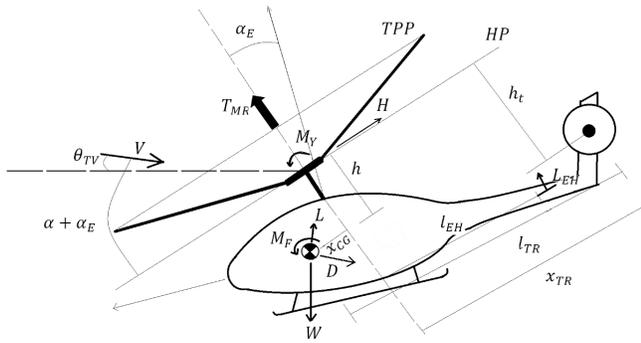


Figura 9 - Fuerzas proyectadas desde el plano de perfil

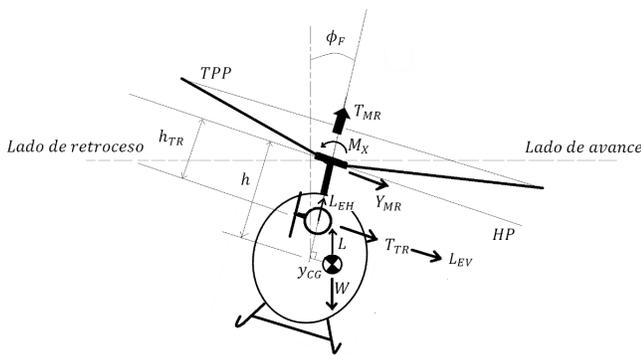


Figura 10 - Fuerzas proyectadas desde el plano de alzado

Empezando por el equilibrio de fuerzas en el eje vertical:

$$W - T_{MR} \cos(\alpha_H + \alpha_E) \cos(\varphi_F) - H_{MR} \sin(\alpha_H + \alpha_E) + D \sin(\theta_{TV}) + Y_{MR} \sin(\varphi_F) + T_{TR} \sin(\varphi_F) - L \cos(\theta_{TV}) \cos(\varphi_F) - L_{EH} \cos(\alpha_H) \cos(\varphi_F) + L_{EV} \sin(\varphi_F) = 0 \quad (11)$$

El equilibrio de fuerzas en el eje longitudinal sería:

$$H_{MR} \cos(\alpha_H + \alpha_E) + D \cos(\theta_{TV}) - T_{MR} \sin(\alpha_H + \alpha_E) \cos(\varphi_F) + L \sin(\theta_{TV}) \cos(\varphi_F) - L_{EH} \sin(\alpha_H) \cos(\varphi_F) = 0 \quad (12)$$

Por su parte en el eje lateral:

$$Y_{MR} \cos(\varphi_F) + T_{TR} \cos(\varphi_F) + T_{MR} \cos(\alpha_H + \alpha_E) \sin(\varphi_F) + L \cos(\theta_{TV}) \sin(\varphi_F) + L_{EV} \cos(\varphi_F) + L_{EH} \sin(\varphi_F) \sin(\alpha_H) = 0 \quad (13)$$

Dónde  $\alpha_H$  es el ángulo de ataque del helicóptero,  $\alpha_E$  es el ángulo de inclinación longitudinal del eje del rotor

principal,  $\phi_F$  ángulo de inclinación lateral del helicóptero,  $\theta_{TV}$  ángulo de trayectoria de vuelo,  $L$  sustentación del fuselaje,  $L_{EH}$  sustentación del estabilizador horizontal,  $L_{EV}$  sustentación del estabilizador vertical,  $D$  arrastre del fuselaje. El subíndice  $MR$  se refiere a que la característica pertenece al rotor principal, mientras que el subíndice  $TR$  se refiere a que la característica pertenece al rotor de cola. Se establece el equilibrio de momentos en torno al rotor principal. Iniciando con el momento de cabeceo:

$$M_Y + M_F + W[x_{CG} \cos(\alpha_H + \alpha_E) - h \sin(\alpha_H + \alpha_E)] + D[h \cos(\alpha_H + \alpha_E) - x_{CG} \sin(\alpha_H + \alpha_E)] + L[h \sin(\alpha_H + \alpha_E) - x_{CG} \cos(\alpha_H + \alpha_E)] + L_{EH} l_{EGH} = 0 \quad (14)$$

Momento de alabeo:

$$M_X + W[h \sin(\varphi_F) - y_{CG} \cos(\varphi_F)] + L[y_{CG} \cos(\varphi_F) - h \sin(\varphi_F)] + T_{TR} h_{TR} = 0 \quad (15)$$

Momento de guiñada:

$$x_{TR} T_{TR} + L_{EV} l_{EV} - Q = 0 \quad (16)$$

Donde  $M_F$  es el momento de cabeceo producido por el fuselaje,  $x$  es la posición en longitudinal del componente,  $h$  es la posición vertical del componente,  $y$  es la posición lateral del componente,  $l_{EH}$  es la posición longitudinal del estabilizador horizontal,  $l_{EV}$  es la posición longitudinal del estabilizador vertical. Los subíndices  $CG$  y  $EH$  corresponden al centro de gravedad y estabilizador horizontal respectivamente

$$L_{EH} = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 A_{EH} [C_{L\alpha\alpha E} (\alpha_{EH} - \alpha_H)] \quad (17)$$

$$L_{EV} = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 A_{EV} [C_{L\alpha\alpha E} \beta_{EV}] \quad (18)$$

Donde  $C_{L\alpha}$  es la pendiente de la curva de sustentación del perfil del estabilizador horizontal o vertical y  $\alpha_{EH}$  y  $\beta_{EV}$  el ángulo de incidencia del estabilizador horizontal y vertical respectivamente.

Los resultados obtenidos de la condición de trimado serán los que permitan el control de la aeronave: el ángulo de paso colectivo  $\theta_0$ , el ángulo de paso cíclico longitudinal  $\theta_{1s}$ , el ángulo de paso cíclico lateral  $\theta_{1c}$ , el ángulo de ataque del helicóptero  $\alpha$  y el ángulo de paso colectivo del rotor de cola  $\theta_{0T}$ . Para resolver las ecuaciones planteadas se utilizará el método de Newton [8] en su forma matricial:

$$\begin{bmatrix} f_0 \\ f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \\ f_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_0} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_{1s}} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_{1c}} & \frac{\partial f_1}{\partial \alpha_H} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_{0T}} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \theta_0} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_{1s}} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_{1c}} & \frac{\partial f_2}{\partial \alpha_H} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta_{0T}} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \theta_0} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_{1s}} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_{1c}} & \frac{\partial f_3}{\partial \alpha_H} & \frac{\partial f_3}{\partial \theta_{0T}} \\ \frac{\partial f_4}{\partial \theta_0} & \frac{\partial f_4}{\partial \theta_{1s}} & \frac{\partial f_4}{\partial \theta_{1c}} & \frac{\partial f_4}{\partial \alpha_H} & \frac{\partial f_4}{\partial \theta_{0T}} \\ \frac{\partial f_5}{\partial \theta_0} & \frac{\partial f_5}{\partial \theta_{1s}} & \frac{\partial f_5}{\partial \theta_{1c}} & \frac{\partial f_5}{\partial \alpha_H} & \frac{\partial f_5}{\partial \theta_{0T}} \\ \frac{\partial f_6}{\partial \theta_0} & \frac{\partial f_6}{\partial \theta_{1s}} & \frac{\partial f_6}{\partial \theta_{1c}} & \frac{\partial f_6}{\partial \alpha_H} & \frac{\partial f_6}{\partial \theta_{0T}} \\ \frac{\partial f_7}{\partial \theta_0} & \frac{\partial f_7}{\partial \theta_{1s}} & \frac{\partial f_7}{\partial \theta_{1c}} & \frac{\partial f_7}{\partial \alpha_H} & \frac{\partial f_7}{\partial \theta_{0T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_0 \\ \Delta \theta_{1s} \\ \Delta \theta_{1c} \\ \Delta \alpha_H \\ \Delta \theta_{0T} \end{bmatrix} = 0$$

$$[f_0] + [J][X] = 0$$

$$[X] = -[J]^{-1}[f_0] \tag{19}$$

El caso actual, la multiplicación de estas matrices no es posible, así que se utilizará la matriz inversa generalizada:

$$[J]^{-1} = \{[J] - [J]\}^{-1} [J]^T \tag{20}$$

Donde  $f_0$  representa el vector que contiene los valores de las funciones estudiadas para el caso del valor actual de las variables,  $J$  es la matriz jacobiana que contiene todas las derivadas de las funciones, con respecto a todas las variables y  $X$  es el vector solución. Pudiéndose entonces resolver el sistema de ecuaciones a través de iteraciones:

$$\theta_0 = \theta_0 + \frac{\Delta \theta_0}{k} \tag{21}$$

$$\theta_{1s} = \theta_{1s} + \frac{\Delta \theta_{1s}}{k} \tag{22}$$

$$\theta_{1c} = \theta_{1c} + \frac{\Delta \theta_{1c}}{k} \tag{23}$$

$$\alpha_H = \alpha_H + \frac{\Delta \alpha_H}{k} \tag{24}$$

$$\theta_{0T} = \theta_{0T} + \frac{\Delta \theta_{0T}}{k} \tag{25}$$

Donde  $k$  es un factor de corrección que aumenta las probabilidades de convergencia (La solución alcanzada con  $k=n$  tomará un número menor de iteraciones que con valores mayores a  $n$ ). La convergencia se alcanza bajo la condición:

$$|\Delta X_i| < 10^{-5}$$

*D. Post-procesamiento*

Luego del análisis realizado, Umbrella cuenta con varias opciones de post-procesamiento para analizar adecuadamente los resultados obtenidos, a través de distintos tipos de gráficas. Se realizó una distribución de todas las características disponibles de los elementos de pala sobre el disco del rotor principal, analizando cada distribución por separado, como se muestra en la Fig. 11:

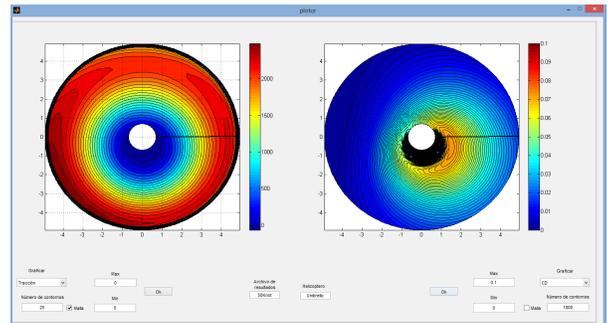


Figura 11 - Distribución de características sobre el rotor.

Es posible obtener datos en función del tiempo o de grados (sobre el acimut del rotor) del comportamiento de los resultados durante la simulación, como es mostrado en la Fig. 12:

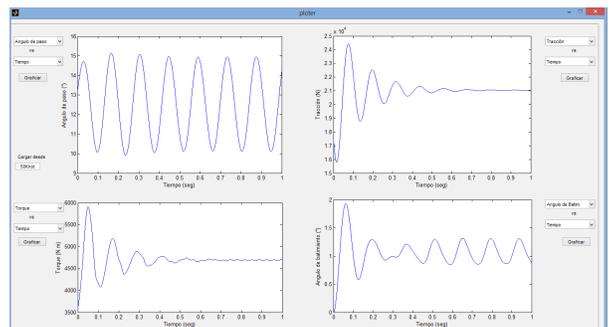


Figura 12 - Datos de simulación

Al finalizar la simulación, se observa la variación definitiva de los resultados por cada revolución del rotor, expuesto en la Fig. 13:

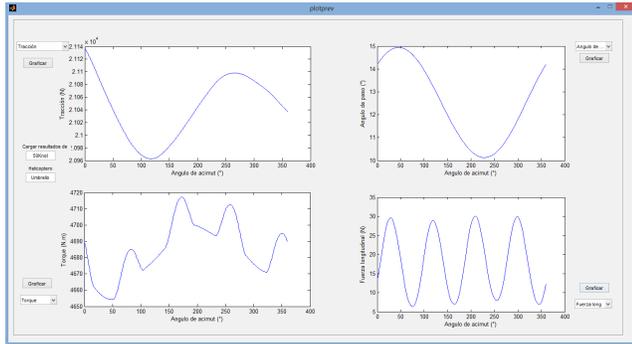


Figura 13 - Parametor en el acimut.

Una vez finalizado el estudio de trimado, Umbrella hace un guardado automático de los resultados en un archivo .mat, el cual puede utilizarse para graficar la variación de las condiciones de trim, en función de la velocidad adimensional de avance o de la velocidad aerodinámica del helicóptero, tal y como se manifiesta en la Fig. 14:

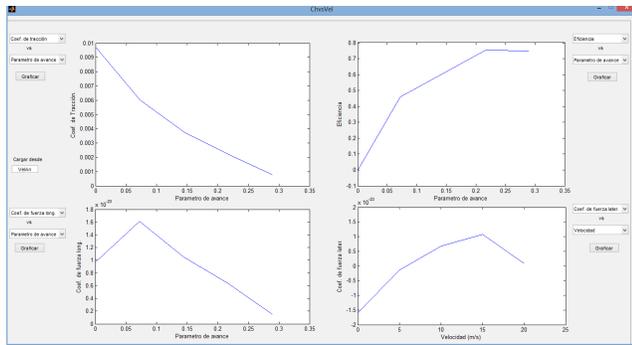


Figura 14 - Datos de trim en función de velocidad.

**XVI. VALIDACIÓN**

Es requerida una validación que certifique los resultados obtenidos a través del programa diseñado. Para ello se comparan los datos obtenidos, a través del código con datos de pruebas de vuelo y otros modelos de simulación. Para el caso actual, fue preciso incluir un módulo que permitiera el trimado de la aeronave, para que los datos disponibles en la literatura pudiesen ser sometidos a comparación, puesto que solo hacen referencia a esta condición. Padfield [6] ofrece resultados que fueron obtenidos, a través de HeliSim y unas pruebas de vuelo del helicóptero Bo105 S123, el cual es descrito por Padfield [6] de la siguiente manera:

“El Bo105 es un helicóptero bimotor de clase 2.5 toneladas, preparado para diversas misiones en transporte, operaciones costa fuera, policía y operaciones de campo de batalla [...] Las características principales del Bo105 son que se trata de un helicóptero de cuatro palas fabricadas en material compuesto de refuerzo de fibra, cuyo rotor no posee

articulaciones (semirrigido)”

Las condiciones establecidas originalmente para el análisis son: a nivel del mar, con un peso total de la aeronave de 21574,63 N, velocidad angular de los rotores consideradas constantes, vuelo horizontal estacionario y cambio únicamente en la velocidad horizontal de la aeronave. En la Fig. 15 es posible visualizar las tres vistas generales del Bo105 S123, a su vez su geometría se describe por las Tablas 1, 2 y 3:

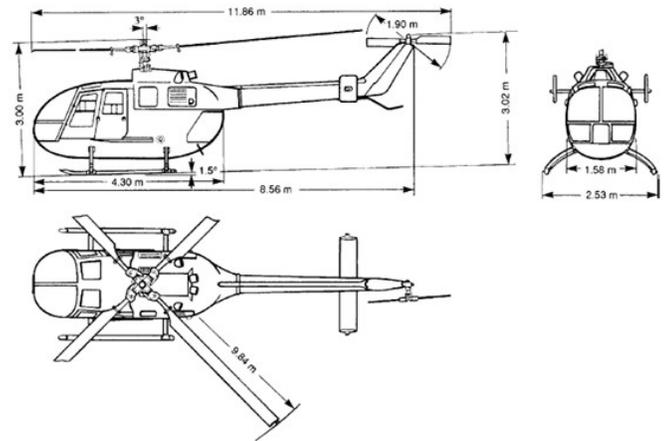


Figura 15 – Tres vistas generales del Bo105 S123 [6]

Tabla 1. Datos del rotor principal del Bo105 [6].

$C_l$	$6,113 \text{ rad}^{-1}$	$c$	$0,27 \text{ m}$	$I_\beta$	$231,7 \text{ Kg m}^2$
$K$	$113330 \text{ N} \frac{\text{m}}{\text{rad}}$	$N$	4	$N^\circ \text{ Lock}$	5,087
$r_h$	$0,69 \text{ m}$	$R$	$4,91 \text{ m}$	$T_w$	$-8^\circ$
$\omega$	$420 \text{ rpm}$	$\delta_3$	$45^\circ$	$\alpha_E$	$3^\circ$

Tabla 2. Datos adicionales del helicóptero Bo105 [6].

$C_{l\alpha_{TR}}$	$5.7 \text{ rad}^{-1}$	$\omega_{TR}$	$2225.9 \text{ rpm}$	$R_{TR}$	$0.95 \text{ m}$
$h_{TR}$	$-0.24 \text{ m}$	$c$	$0.2 \text{ m}$	$A_{EH}$	$0.803 \text{ m}^2$
$N_{TR}$	2	$x_{TR}$	$6 \text{ m}$	$x_{EH}$	$4.56 \text{ m}$

Tabla 3. Datos adicionales del helicóptero Bo105 [6].

$\alpha_{EH}$	$4^\circ$	$\beta_{EV}$	$4.65^\circ$
$A_{EV}$	$0.805 \text{ m}^2$	$x_{CG}$	$-0.0163 \text{ m}$
$x_{EV}$	$5.416 \text{ m}$	$h_{CG}$	$1.48 \text{ m}$

Donde  $C_{l\alpha}$  es la pendiente de sustentación del perfil en la pala,  $r_h$  es el radio del cubo del rotor,  $\delta_3$  es el ángulo de acoplamiento de paso-batimiento,  $\alpha_E$  es el ángulo de inclinación del eje del rotor,  $h$  es la distancia vertical al cubo del rotor,  $x$  es la distancia longitudinal al eje del rotor,

$A$  es el área de referencia del componente,  $\alpha_{EH}$  es el ángulo de incidencia del estabilizador horizontal,  $\beta_{EV}$  es el ángulo de incidencia del estabilizador vertical. Los sufijos  $TR$ ,  $EV$ ,  $EH$  y  $CG$  hacen referencia a que las variables pertenecen al rotor de cola, estabilizador vertical, estabilizador horizontal y centro de gravedad correspondientemente.

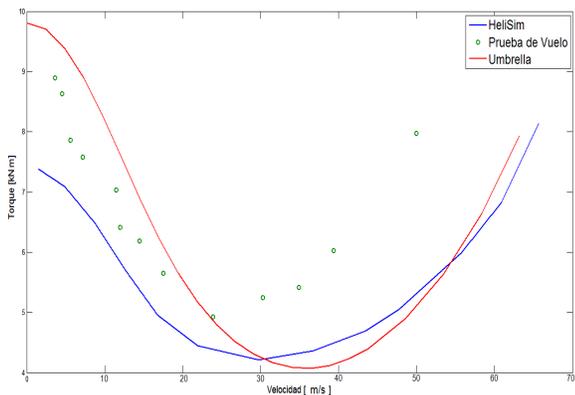


Figura 16 – Torque del rotor principal.

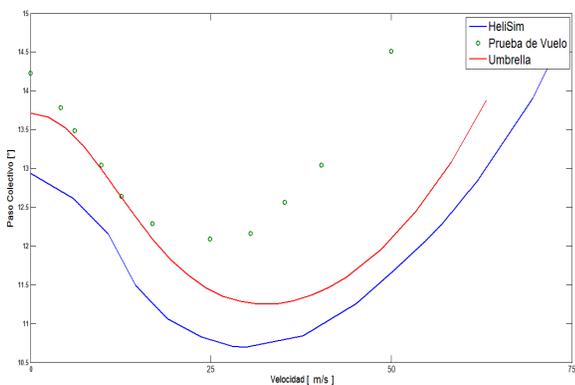


Figura 17 – Paso Colectivo del rotor principal.

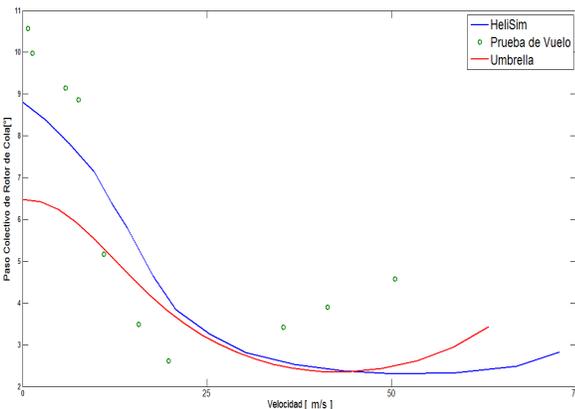


Figura 18 – Paso Colectivo del rotor de cola.

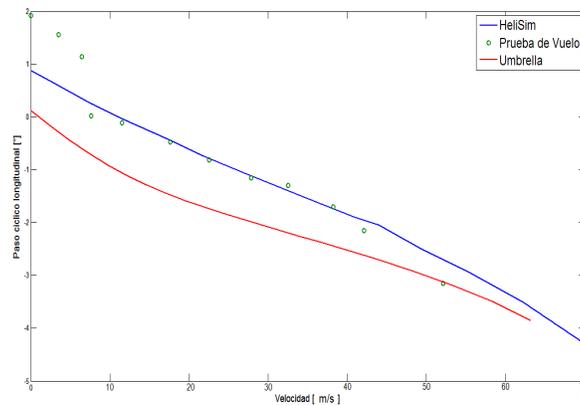


Figura 19 – Paso Cíclico longitudinal.

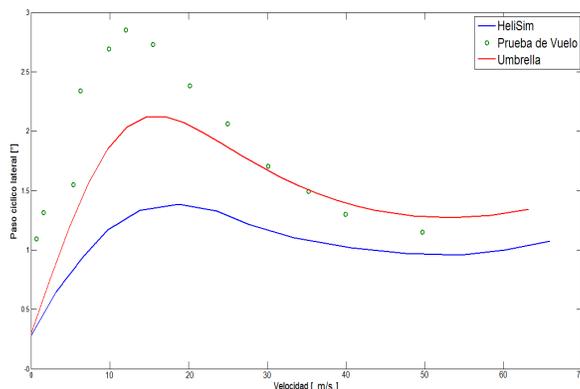


Figura 20 – Paso Cíclico Lateral.

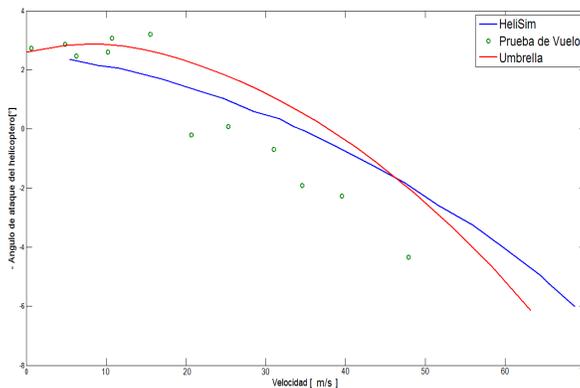


Figura 21 – Paso Cíclico Lateral.

De la Fig. 16 a la 21, se refleja que la prueba de vuelo es representada por los puntos verdes, HeliSim por la línea azul y Umbrella por la línea roja. La Fig. 17 representa el paso colectivo del rotor principal en función de la velocidad, y se aprecia como Umbrella tiene mayor semejanza con la prueba de vuelo para bajas velocidades, posterior a esto su semejanza es superior con HeliSim. En la Fig. 20 se muestra la variación del paso cíclico lateral en función de velocidad, y en este caso Umbrella obtiene mayor cercanía con la prueba de vuelo.

XVII. ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL BO105 S123

El programa además cuenta con módulos que permiten graficar la respuesta del sistema estudiado, en función de toda la simulación (tiempo) y la visualización sobre el rotor de los parámetros aerodinámicos obtenidos. Con los mismos datos obtenidos del análisis para el trimado realizado al Bo105 S123, se utiliza el módulo del programa que permite la visualización de los parámetros sobre el rotor, como es mostrado en la Fig. 22 y 23 para velocidades de 5 m/s, 25 m/s y 50 m/s (el helicóptero se mueve hacia la izquierda).

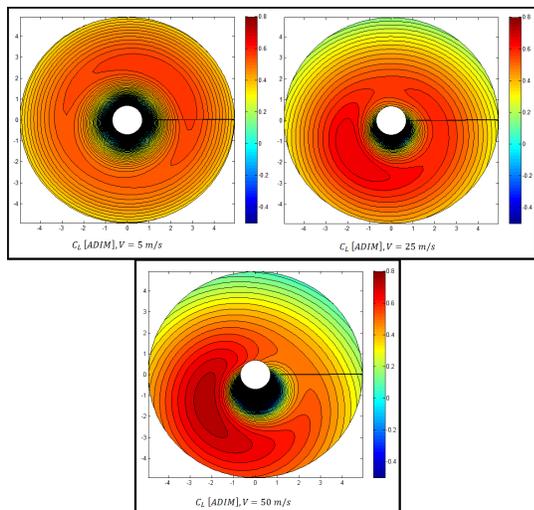


Figura 22 – Distribución del coeficiente de sustentación.

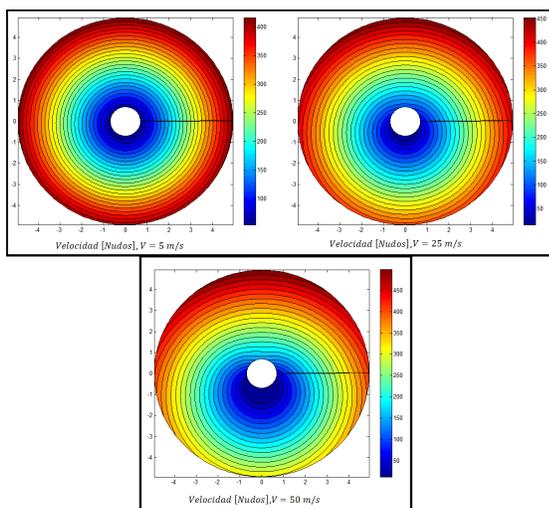


Figura 23 – Distribución de velocidad.

Visualizar el comportamiento general de la simulación realizada es importante para determinar si esta se ha efectuado de manera correcta, llegando a una condición permanente de respuesta, en la que se pueda concluir que el análisis ha finalizado. Para ello es posible utilizar módulos en donde se registran los datos que se obtienen durante toda la

simulación, como se muestra en la Fig. 24. Por otra parte, el comportamiento de los parámetros, a medida que cambia la posición de las palas sobre el acimut del rotor, también se visualiza a través del programa, evidenciado en la Fig. 18. Estas gráficas fueron obtenidas para una velocidad horizontal de 25 m/s.

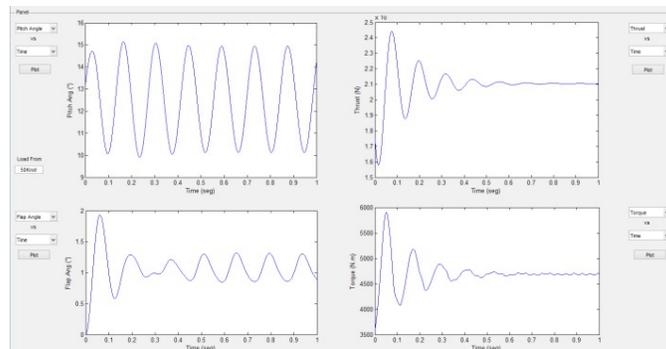


Figura 24 – Datos de simulación.

En la Fig. 25 se percibe el cambio en la distribución del coeficiente de sustentación sobre el rotor, el cual aumenta en la zona de la pala que retrocede conforme aumenta la velocidad, lo que concuerda con lo expuesto en la literatura, debido a que en esta zona es requerido un crecimiento del coeficiente de sustentación para lograr las cargas que mantengan al helicóptero en su trayectoria. La Fig. 23 concuerda con la distribución de velocidades aerodinámicas que debería tener el rotor en vuelo horizontal. En la Fig. 24 se verifica que la simulación se ha llevado a cabo correctamente, pues las respuestas del sistema han concluido en una condición permanente. Finalmente, en la Fig. 25 se muestra la variación de los parámetros en función del movimiento de las palas sobre el acimut.

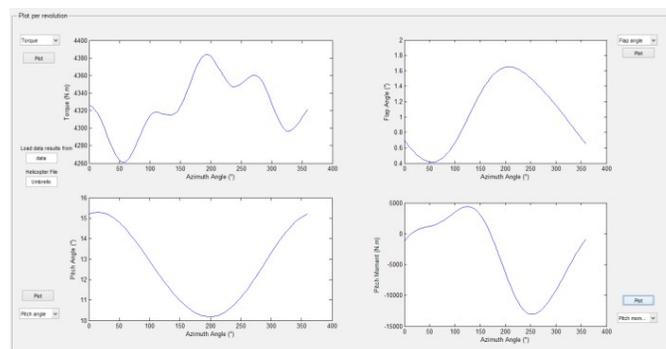


Figura 25 – Parámetros en el acimut

## XVIII. CONCLUSIONES

II. En los resultados mostrados a través de las Fig. 9 a la 14, se evidencia la comparación entre la prueba de vuelo, HeliSim y el programa desarrollado Umbrella, en las que hay semejanza en comportamiento y aproximación en los valores correspondientes, lo que indica un acercamiento a la realidad del método empleado para el análisis aerodinámico aplicado en Umbrella. Las relaciones porcentuales favorecen a Umbrella en las Fig. 9, 10 y 13, obteniendo valores desde 5% hasta 18% de diferencia general con las pruebas de vuelo, mientras que en las otras obtiene diferencias mayores a 32% al igual que HeliSim, con la excepción de la Fig. 12, en la cual se aleja porcentualmente de la prueba de vuelo. Sin embargo, la diferencia entre los resultados en ángulos son menores a 2°.

III. Con esto se concluye que el programa computacional cumple correctamente con lo propuesto, pues realiza análisis al rotor principal del helicóptero, demostrándolo a través de los requerimientos aerodinámicos que implica conseguir la condición de trimado de la aeronave.

## REFERENCIAS

- [1] Bramwell, A. R. S., Done, George & Balmford David. *Bramwell's Helicopter Dynamics* Second edition. Gran Bretaña: Bath Press, Avon, 2001.
- [2] Cruz, F., Oropeza, R. & Viguera, R. *Análisis aerodinámico de una pala del rotor principal de un helicóptero experimental*. Trabajo de Grado, Instituto Politécnico Nacional de México, Ciudad de México, 2011.
- [3] Sevinç, Çalişkan. *Development of Forward Flight Trim and Longitudinal Dynamic Stability Codes and Their Application to a UH-60 Helicopter*. Tesis de Maestría, Universidad Técnica de Medio Oriente, Ankara, 2009.
- [4] Durand, William. *Aerodynamic Theory*. California, Estados Unidos: California Institute of Technology, 1943.
- [5] Johnson, Wayne. *Helicopter Theory*. Nueva Jersey: Princeton University Press, 1980.
- [6] Padfield, G. *Helicopter Flight Dynamics, The Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modelling*. Oxford, Reino Unido: Blackwell Publishing, 2007.
- [7] Leishman J. Gordon. *Principles of Helicopter Aerodynamics*. Cambridge, Reino Unido: Pess Syndicate of the University of Cambridge, 2006.
- [8] Venkatesan C. *Fundamentals of helicopter dynamics*. Boca Raton, FL: CRC PRes Taylor & Francis Group, 2015.